



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ  
УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ІВАНА ПУЛЮЯ**

**Кафедра світлотехніки та електротехніки**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання практичних занять**

**з дисципліни**

**ТЕХНОЛОГІЯ  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО  
ВИРОБНИЦТВА**

**для студентів напрямку підготовки  
6.050701 – Електротехніка та електротехнології**

**ТЕРНОПІЛЬ, 2015**

Методичні вказівки до виконання практичних занять з дисципліни  
“Технологія електротехнічного виробництва” для студентів напряму  
підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології. / Уклад.: Я.М.  
Осадца. – Тернопіль: ТНТУ 2015 – 56 с.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
імені ІВАНА ПУЛЮЯ**

**Кафедра світлотехніки та електротехніки**

**М Е Т О Д И Ч Н І   В К А З І В К И  
до виконання практичних занять**

**з дисципліни**

**ТЕХНОЛОГІЯ  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО  
ВИРОБНИЦТВА**

**для студентів напряму підготовки  
6.050701 – Електротехніка та електротехнології**

*Розглянуто на засіданні  
кафедри світлотехніки та електротехніки*

*протокол №\_\_ від \_\_\_\_\_ 2015 р.*

*Затверджено на засіданні методичної комісії  
електромеханічного факультету*

*протокол №\_\_ від \_\_\_\_\_ 2015 р.*

**ТЕРНОПІЛЬ, 2015**

## **ЗМІСТ**

<b>ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1</b> <b>«Розрахунок показників технологічності виробів»</b>	<b>4</b>
<b>ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2</b> <b>«Механічна обробка деталей»</b>	<b>9</b>
<b>ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3</b> <b>«Обробка деталей тиском»</b>	<b>24</b>
<b>ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4</b> <b>«Технологія виготовлення виробів із світло пропускних матеріалів»</b>	<b>36</b>
<b>ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5</b> <b>«Покриття виробів»</b>	<b>45</b>
<b>Література</b>	<b>52</b>

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1

### РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ВИРОБІВ

Відповідно до ГОСТ 14.205-83 технологічність – це сукупність властивостей конструкції виробу, що визначають його пристосованість до досягнення оптимальних витрат при виробництві, експлуатації та ремонті при заданих показниках якості, обсягу випуску і умов виконання робіт [1].

Виробнича технологічність конструкції деталі – це ступінь її відповідності вимогам найбільш продуктивного і економічного виготовлення. Чим меншою є трудомісткість і собівартість виготовлення, тим більш технологічною є конструкція деталі.

Оцінка технологічності конструкції буває двох видів: якісна та кількісна. Якісна оцінка технологічності є попередньою, узагальненою і характеризується показниками: «краще – гірше», «рекомендується – не рекомендується», «технологічно – не технологічно» і т.п. Технологічною при якісній оцінці слід вважати таку геометричну конфігурацію деталі і окремих її елементів, при якій враховано можливості мінімальної витрати матеріалу і використання найбільш продуктивних і економічних для певного типу виробництва методів виготовлення. У зв'язку з цим слід проаналізувати креслення деталі, наприклад, з точки зору:

- ступеня уніфікації геометричних елементів (діаметрів, довжин, різьб, модулів, радіусів переходу і т.п.) в конструкції;
- наявності зручних базуючих поверхонь, що забезпечують можливість суміщення і сталості баз;
- умови можливості вільного підведення і виведення ріжучого інструменту при обробці;
- вигоди контролю параметрів точності деталі;
- можливості зменшення протяжності точних поверхонь обробки;
- відповідності форми дна отвору формі кінця стандартного інструменту для його обробки (свердла, зенкера, розгортки) і т.п.

Кількісна оцінка технологічності виражається показником, чисельне значення якого характеризує ступінь задоволення вимог до технологічності. Згідно ГОСТ 14.202-73 номенклатура показників технологічності виробу містить 4 основних та 31 додаткових показників.

Стосовно виробництву кількісну оцінку технологічності здійснюють сумарною трудомісткості  $\sum T$  і технологічної собівартості  $C_T$ , а також технічних показників, визначення яких здійснюється згідно креслення деталі. До них відносяться коефіцієнти точності  $K_m$  і шорсткості  $K_{ш}$  деталі.

Ці та інші показники визначаються за формулами:

$$K_m = 1 - \frac{1}{T_{cp}} \quad (1.1)$$

$$T_{cp} = \frac{\sum T_i \cdot n_i}{\sum n_i}, \quad (1.2)$$

$$K_{ш} = \frac{1}{Ra_{cp}}, \quad (1.3)$$

$$Ra_{cp} = \frac{\sum Ra_i \cdot n_i}{\sum n_i}, \quad (1.4)$$

де  $T_i$ ,  $Ra_i$  – відповідно квалітети точності та значення шорсткості поверхонь, які обробляються;

$T_{cp}$ ,  $Ra_{cp}$  – середні значення точності та шорсткості оброблювальних поверхонь;

$n_i$  – число розмірів або поверхонь для кожного квалітету і значення параметру шорсткості.

У загальному випадку технологічність деталі повинна оцінюватися шляхом порівняння її показників з відповідними показниками деталі-аналога. Під деталлю-аналогом розуміється базова деталь, що виконує у виробі ті ж функції, що і задана деталь, і яка має відомі базові показники.

Звідси трудомісткість деталі  $T_D$  може бути визначена як

$$T_D = T_A \cdot K_M \cdot K_{скл} \cdot K_N \quad (1.5)$$

де  $T_A$  – трудомісткість деталі-аналога;

$K_M$ ,  $K_{скл}$ ,  $K_N$  – коефіцієнти, які враховують різницю між деталлю та деталлю-аналогом відповідно по масі, складності виготовлення та програмі випуску.

Коефіцієнт, який враховує різницю між деталлю та деталлю-аналогом по масі визначається за формулою:

$$K_M = \left( \frac{M_D}{M_A} \right)^{0,67} \quad (1.6)$$

3

де  $M_D$ ,  $M_A$  – відповідно маса деталі та маса деталі-аналога.

Коефіцієнт, який враховує різницю у складності виготовлення:

$$K_{скл} = \frac{K_{тнмД} \cdot K_{шнмД}}{K_{тнмА} \cdot K_{шнмА}}, \quad (1.7)$$

де  $K_{тнмД}$ ,  $K_{шнмД}$ ,  $K_{тнмА}$ ,  $K_{шнмА}$  – відповідно коефіцієнти, які показують зміну трудомісткості залежно від зміни найменших значень квалітету точності і параметра шорсткості деталі і деталі-аналога, причому

$$K_{тнм} = 4 \cdot T_{нм}^{-0,63}, \quad (1.8)$$

$$K_{шнм} = 1,19 \cdot Ra_{нм}^{-0,071}, \quad (1.9)$$

де  $T_{нм}$ ,  $Ra_{нм}$  – відповідно найменші значення квалітету точності та параметру шорсткості поверхні.

Коефіцієнт, який враховує різницю по програмі випуску:

$$K_N = \left( \frac{N_A}{N_D} \right)^b \quad (1.10)$$

де  $N_A$ ,  $N_D$  – відповідно річний випуск аналога та деталі;

$b$  – показник степеня, який визначається за формулою

$$b = 0,2 \cdot M_D^{-0,045}. \quad (1.11)$$

**Приклад 1.1.** Визначити технологічність деталі (рис 1.1) по технічних показниках – коефіцієнтах точності  $K_m$  і шорсткості  $K_u$ . Матеріал деталі сталь 45, маса деталі 4,5 кг, твердість після термообробки 42...46,5 HRC.

**Розв’язання.** Із креслення деталі (рис. 1.1) видно, що сумарна кількість вказаних на кресленні розмірів становить  $\sum n_i = 13$ , із яких 3 розміри виконуються по 6-му квалітету точності, 7 розмірів – по 14-му і по одному розмірі з квалітетами 12, 11 та 8. Також 4 поверхні мають середнє арифметичне відхилення профілю  $Ra = 2,0$  мкм, 8 поверхонь –  $Ra = 15$  мкм і по одній поверхні з жорсткостями  $Ra = 0,25$ ,  $Ra = 1,0$ ,  $Ra = 6,3$  мкм.

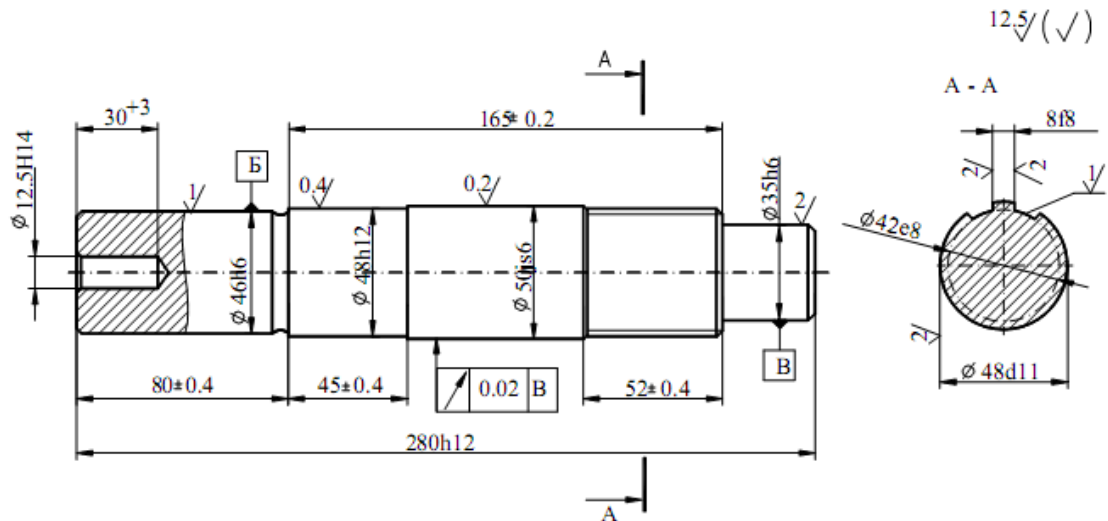


Рис. 1.1. Креслення деталі

Підставляючи значення у формули (1.1) – (1.4), отримаємо

$$T_{cp} = \frac{14 \cdot 7 + 12 \cdot 1 + 11 \cdot 1 + 8 \cdot 1 + 6 \cdot 3}{13} = 11,3,$$

$$K_m = 1 - \frac{1}{11,3} = 0,91,$$

$$Ra_{cp} = \frac{15 \cdot 8 + 6,3 \cdot 1 + 2,0 \cdot 4 + 1,0 \cdot 1 + 0,25 \cdot 1}{15} = 9,03 \text{ мкм},$$

$$K_{ш} = \frac{1}{9,03} = 0,11.$$

**Приклад 1.2.** Визначити трудомісткість деталі при відпрацюванні її на технологічність, якщо відомо, що трудомісткість виготовлення деталі-аналога становить  $T_A = 36,0$  хв при річному обсязі випуску  $N_A = 1000$  шт. Відомо також, що маса деталі  $M_D = 2,2$  кг, її аналога  $M_A = 2,6$  кг, найменші квалітет і параметр шорсткості відповідно  $T_{шД} = 8$ ,  $T_{шА} = 10$ ,  $Ra_{шД} = 1,25$  мкм,  $Ra_{шА} = 2,5$  мкм. Річна програма випуску деталі передбачається  $N_D = 1250$  шт.

**Розв’язування.** Підставляючи значення умови задачі у формули (1.1) – (1.11), отримаємо

$$K_M = \left( \frac{2,2}{2,6} \right)^{0,67} = 0,894;$$

$$K_{тшД} = 4 \cdot 8^{-0,63} = 1,08; K_{тшА} = 4 \cdot 10^{-0,63} = 0,94;$$

$$K_{шшД} = 1,19 \cdot 1,25^{-0,071} = 1,17; K_{шшА} = 1,19 \cdot 2,5^{-0,071} = 1,11$$

$$K_{скл} = \frac{1,08 \cdot 1,17}{0,94 \cdot 1,11} = 1,2;$$

$$b = 0,2 \cdot 2,2^{-0,045} = 0,193; K_N = \left( \frac{1000}{1250} \right)^{0,193} = 0,96;$$

$$T_D = 36 \cdot 0,894 \cdot 1,2 \cdot 0,96 = 37,0 \text{ хв.}$$

Таким чином, незважаючи на істотне збільшення трудомісткості за рахунок складності обробки ( $K_{скл} > 1$ ), технологічність деталі по трудомісткості в порівнянні з аналогом практично не змінюється, оскільки зменшена маса і збільшена річна програма випуску.

### **Завдання для самостійного виконання**

**Завдання 1.1.** Визначити технологічність деталі по технічних показниках – коефіцієнтах точності  $K_m$  і шорсткості  $K_{ш}$ . Креслення деталі, а також параметри її точності та шорсткості отримати у викладача.

**Завдання 1.2.** Визначити трудомісткість деталі при відпрацюванні її на технологічність по умовах, наведених в таблиці 1.1.



Таблица 1.1

№ вар.	Деталь				Деталь-аналог				
	$M_D$ , кг	$T_{нмД}$ , к-т	$Ra_{нмД}$ , мкм	$N_D$ , шт	$M_A$ , кг	$T_{нмА}$ , к-т	$Ra_{нмА}$ , мкм	$N_A$ , шт	$T_A$ , хв
1	2,3	8	2,5	1500	2,8	7	1,25	1000	36,0
2	7,2	10	6,3	2500	6,9	9	2,5	3000	15,8
3	12,4	9	2,5	1000	13,7	10	5,3	1500	42,0
4	1,2	7	0,63	1500	1,5	6	0,32	1000	28,0
5	2,8	6	0,32	60000	2,3	7	0,63	40000	10,6
6	0,8	11	2,5	25000	1,1	10	1,25	30000	31,0
7	6,5	10	1,25	25000	6,1	9	0,63	15000	22,0
8	10,0	10	2,5	1000	9,2	11	6,3	1200	13,5
9	21,6	8	1,25	25000	22,8	9	2,5	2000	7,5
10	16,4	7	0,63	500	14,8	6	0,32	1000	26,0
11	8,6	7	1,25	800	10,0	8	2,5	600	18,0
12	2,6	12	6,3	3500	2,9	10	2,5	5000	34,0

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

### МЕХАНІЧНА ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ

Механічна обробка представляє собою складний процес деформування та руйнування матеріалів, в результаті якого з поверхні вихідної заготовки видаляється стружка та утворюється деталь заданих форм, розмірів та шорсткості поверхні. За допомогою механічної обробки отримують різні деталі електричних апаратів: рами, каркаси, корпусні деталі, основи, кришки, шкафи, контактні деталі, пружини, кронштейни світильників, з'єднувальні елементи, тощо.

Механічну обробку застосовують також для отримання посадочних поверхонь у деталей, виготовлених литтям та штампуванням, наприклад здійснюють проточку корпусів вибухозахищених світильників для спряження їх з фланцями. Широке застосування механічна обробка знайшла для отримання посадочних поверхонь при складанні виробів.

Видалення шару матеріалу з поверхні заготовки здійснюють трьома способами:

1) за допомогою ріжучого інструменту, в якості якого використовуються різці клиновидної та іншої форм, свердла, фрези, протяжки і т. д.;

2) за допомогою абразивного інструменту, в якості якого застосовують шліфувальні круги;

3) шляхом випаровування або розплавлення частини металу під дією високих енергій: електронного імпульсу, лазера, променя, ультразвуку або під дією плазми.

Усі види руху при обробці різанням поділяються на три групи:

- робочий рух (або рух різання);
- установчий;
- допоміжний.

Складовими робочих рухів є головний рух і рух подачі. Головний рух здійснює процес зняття стружки, а рух подачі – процес різання. Наприклад, під час свердління головним рухом є обертання свердла, а його переміщення вздовж осі або вбік – є рух подачі, що дозволяє одержати наскрізний отвір або канавку певної глибини.

У металорізальних верстатах головний рух найчастіше буває обертальним (токарні, свердлильні, фрезерні, шліфувальні верстати) або прямолінійним (стругальні, довбальні верстати). Головний рух надається заготовкам (верстати токарної групи) або різальному інструменту (фрезерні, поперечно-стругальні тощо). У верстатах з головним обертальним рухом подача і різання безперервні, у верстатах з головним зворотно-поступальним – різання переривчасте.

Основними елементами процесу різання відносять:

- поверхні заготовки;
- координатні площини;

- елементи різальної частини;
- геометрія різця (кути, режими різання і розміри заданого шару металу).

Оброблювана поверхня (рис. 2.1) – це поверхня заготовки, з якої знімають стружку; оброблена поверхня – це та, з якої знято стружку; поверхня різання утворюється головним різальним лезом різця.

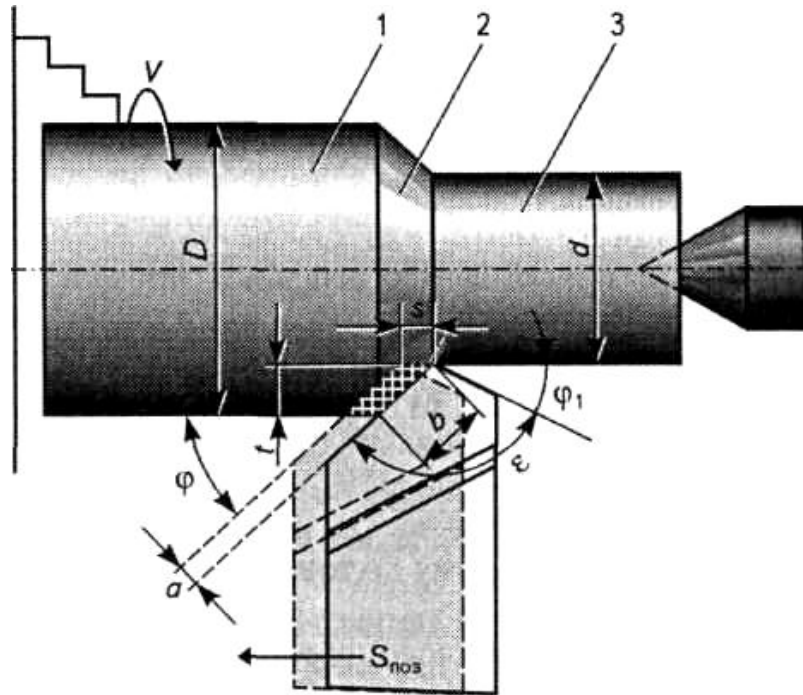


Рис. 2.1. Елементи різання і геометрія шару металу, що зрізується:  
1 – оброблювана поверхня; 2 – поверхня різання; 3 – оброблена поверхня

Координатною площиною називають площину різання, дотичну до поверхні різання, що проходить через головне різальне лезо різця, і основну площину, паралельну напрямку поздовжньої ( $S_{\text{поз}}$ ) і поперечної подач.

Конструктивно різець складається з робочої частини, що приймає участь в процесі різання, і тримача, який служить для закріплення його в різцетримачі. Робоча частина різця утворюється шляхом спеціальної заточки і складається з наступних елементів: передньої поверхні, задньої поверхні, різальних кромок та вершини (рис. 2.2). Кути  $\alpha, \beta, \gamma$  визначають ріжучі властивості та стійкість різця.

До основних параметрів процесу різання відносять глибину і швидкість різання, подачу, ширину і товщину шару металу, що зрізується, та номінальну площу його перерізу.

Глибиною різання ( $t$ ) називають товщину шару металу, який зрізається за один прохід різального інструмента. При повздовжньому точінні циліндричної поверхні глибина різання визначається як

$$t = \frac{D - d}{2}, \quad (2.1)$$

де  $D$  – діаметр заготовки, мм;  
 $d$  – діаметр обробленої поверхні, мм.

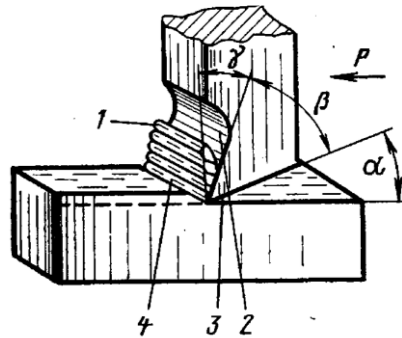


Рис. 2.2. Схема, що пояснює процес різання:

1 – стружка; 2 – передня поверхня різця, по якій сходять стружка;  
 3 – задня поверхня різця; 4 – ріжуча кромка;  $\alpha$  – задній кут;  $\beta$  – кут загострення;  $\gamma$  – передній кут.

Швидкістю різання ( $V$ ) називають швидкість головного руху. Вона визначається шляхом, що пройшла точка оброблюваної поверхні заготовки відносно різальної кромки інструмента за одиницю часу, і вимірюється у метрах за хвилину (м/хв), крім випадків, коли швидкість різання дуже велика (шліфування). Тоді її вимірюють у метрах за секунду (м/с). За умов головного обертального руху (фрезерування, точіння, свердлення) швидкість різання визначається як

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (2.2)$$

де  $D$  – діаметр заготовки (або інструмента), мм;

$n$  – частота обертання заготовки (або інструмента), хв.

Подача ( $S$ ) – це переміщення різальної кромки інструмента відносно заготовки в напрямку подачі за один оберт (мм/об) або подвійний хід заготовки (чи інструмента) (мм/под.хід). Залежно від напрямку руху подача може бути поздовжньою, поперечною, похилою, вертикальною, тангенціальною, круговою тощо.

Ширина шару різання ( $a$ ) – це відстань між двома послідовними положеннями різальної кромки за час повного оберту заготовки, заміряна в напрямку, нормальному до товщини шару зрізаного металлу  $b$  (рис. 2.1). Ширина шару різання визначається за формулою

$$a = S \cdot \sin \varphi. \quad (2.2)$$

Номінальна площа поперечного перерізу шару, що зрізується, (в квадратних міліметрах) визначається добутком подачі на глибину різання або товщини шару, що зрізується, на його ширину:

$$f = S \cdot t = a \cdot b. \quad (2.3)$$

Якість обробленої поверхні характеризують її шорсткість, хвилястість, наявність мікротріщин, надривів, подрібнення структури, нагартування і залишкові напруження. Шорсткість має визначальний вплив на експлуатаційні властивості виробів – стійкість проти спрацювання, втомну міцність, корозійну стійкість тощо.

Шорсткістю називають сукупність нерівностей поверхні деталі на певній (базовій) її довжині. Для кількісної оцінки шорсткості існують шість параметрів:

- середнє арифметичне відхилення профілю ( $R_a$ );
- висота нерівностей профілю за десятьма точками ( $R_e$ );
- найбільша висота нерівностей ( $R_{max}$ );
- середній крок нерівностей;
- середній крок нерівностей за їх вершинами;
- відносна довжина профілю.

З чотирнадцяти існуючих класів шорсткості найбільш грубою і шорсткою є поверхня першого класу ( $R_z = 160...320$  мкм), а найбільш гладкою – поверхня чотирнадцятого класу ( $R_z < 0,1$  мкм).

Рівень шорсткості залежить від умов різання. Для зменшення шорсткості необхідно або збільшити радіус заокруглення вершини різця, або зменшити кути різця в плані.

Залежно від умов різання і властивостей оброблюваного матеріалу може формуватися стружка трьох основних видів (рис. 2.3).

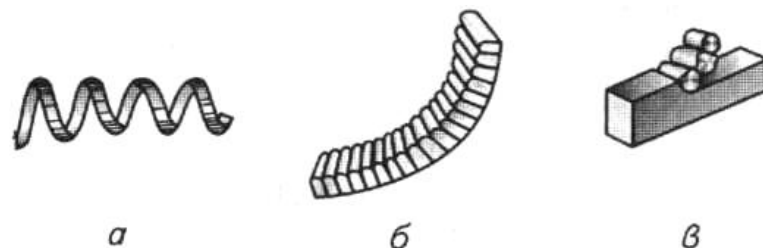


Рис. 2.3. Види стружки різання:

а – зливна стружка; б – стружка сколювання; в – стружка надлому

Зливна стружка (рис. 2.3, а) має вигляд суцільної стрічки з гладкою внутрішньою (біля різця) і шорсткою зовнішньою поверхнями. Границі між елементами стружки не спостерігаються.

Стружка сколювання (рис. 2.3, б) утворюється при оброблюванні менш пластичних, твердих матеріалів. Поверхня стружки біля різця також гладка, а на зовнішній поверхні видно зазубринки. Стружка складається з елементів (що не втратили зв'язку між собою) з видимими границями.

Стружка надлому (рис. 2.3, в), або елементна, утворюється при оброблюванні крихких матеріалів і складається з окремих елементів випадкової форми, не пов'язаних між собою. Таку стружку іноді називають стружкою відриву, оскільки її утворення викликане дією напружень розтягування.

Вигляд стружки часто використовується як непряма характеристика роботи різання. Найбільших витрат енергії потребує утворення стружки

сколювання (значний ступінь пластичної деформації), менших – утворення звивної, і найменших – утворення стружки надлому (незначна пластична деформація).

Спрацювання різальної частини інструмента характеризує його здатність протидіяти мікроскопічному руйнуванню на поверхнях контакту з заготовкою та стружкою. Розрізняють кілька видів спрацювання інструмента.

Абразивне спрацювання – це механічне зношування, дряпання інструмента твердими частинками оброблюваного матеріалу, твердість яких співрозмірна твердості матеріалу інструмента. Цей вид спрацювання переважає при відносно невеликих швидкостях різання і під час обробки крихких матеріалів (зазвичай по основній задній поверхні інструмента).

Адгезійне спрацювання – це наслідок процесу холодного зварювання матеріалу інструмента і стружки на виступаючих ділянках площі контакту між ними з наступним відривом дрібних частинок матеріалу інструмента і виносом їх зі стружкою із зони різання.

Дифузійне спрацювання відбувається внаслідок взаємної дифузії матеріалу інструмента і оброблюваної заготовки за умови підвищення температури контактних поверхонь до 900...1000 °С.

Окисне спрацювання має місце при температурах різання 700...800 °С, коли кисень повітря вступає в хімічну реакцію з матеріалом інструмента (кобальтовою складовою твердого сплаву, карбідами вольфраму і титану).

Крихке спрацювання – це процес сколювання (викришування) макрочасток матеріалу інструмента.

У процесі різання спостерігається одночасна дія різних видів спрацювання, що визначає кінцеву стійкість інструмента за даних умов.

Стійкістю інструмента називають час його роботи за певних режимів різання між операціями його переточування. На стійкість впливають такі фактори, як хімічний склад і властивості оброблюваного матеріалу, матеріал, з якого зроблений різальний інструмент, режим різання та умови обробки. Наприклад, стійкість токарних різців зі швидкорізальних сталей у середньому дорівнює 30...60 хв., твердосплавних різців – 45...90 хв., циліндричних фрез – 180...240 хв.

Однією з основних характеристик спрацювання і стійкості інструменту є критерій затуплення – гранично допустима величина зношування, за якої інструмент втрачає нормальну працездатність. Критерієм затуплення вважають певний рівень спрацювання головної задньої поверхні інструмента, оскільки це зумовлює збільшення сил різання, тертя, підвищення температури, шорсткості оброблюваної деталі.

Виходячи з умов експлуатації (високі напруження і температури), матеріал різального інструменту повинен відповідати високим вимогам щодо його властивостей. Основні з них: високі твердість, стійкість проти спрацювання, теплопровідність і достатня в'язкість. Важливою характеристикою різального інструменту є також червонотривкість – здатність зберігати високу твердість за високих температур (при нагріванні

до темно-червоного світіння). Крім цього, матеріали для виготовлення інструменту повинні містити у своєму складі мінімальну кількість дефіцитних легуючих елементів.

Основними інструментальними матеріалами є вуглецеві та леговані інструментальні сталі, тверді металокерамічні сплави і мінералокерамічні матеріали.

Вуглецеві інструментальні сталі містять 0,9...1,3 % С (У 10, У11, У12, У13). З підвищенням вмісту вуглецю твердість сталей зростає і після гартування може дорівнювати 60...63 HRC. Проте у зв'язку з низькою теплостійкістю (200...250°C) застосування їх обмежене. З вуглецевих сталей виготовляють інструмент для невеликих (до 15...18 м/хв) швидкостей різання (плашки, розвертки, ножовочні полотна тощо).

Леговані інструментальні сталі забезпечують високу твердість і теплостійкість (250...300°C) інструменту. Легування сталі такими елементами, як Cr, V, Mo, W тощо, підвищує їхні міцність, прогартуваність, зносостійкість, теплостійкість. Інструменти з легованої сталі мають кращі різальні властивості, менш схильні до деформації й тріщиноутворення під час гартування. Оскільки теплостійкість цих інструментів невисока, їх використовують при швидкостях різання, що не перевищують 25 м/хв (свердла, розвертки, мітчики, плашки, протяжки тощо).

Швидкорізальні сталі – це леговані сталі, що містять у своєму складі значну кількість вольфраму (близько 19 %), хрому (близько 4,5%), молібдену (близько 5 %), а також ванадій, кобальт, інші домішки. Після гартування і відпуску твердість швидкорізальної сталі дорівнює 62...65 HRC, теплостійкість 650°C, тобто червонотривкість цих сталей висока. Для економії дефіцитних і дорогих елементів інструменти з швидкорізальних сталей виготовляють з хвостовиком із конструкційної сталі. Такі інструменти можуть витримувати швидкості різання, що у 4 рази перевищують швидкість різання інструменту з вуглецевих сталей. Для виготовлення інструментів складної форми і підвищеної стійкості використовують сталі типу Р18, для інструментів інших форм – сталі типу Р9. Число після літери «Р» у марках швидкорізальних сталей означає вміст вольфраму (у відсотках). Кобальтові сталі Р9К6, Р9КФ, РЦК5Ф2 використовують для виготовлення інструментів, що працюють за умов переривчастого різання, вібрації, а також для обробки важкооброблюваних неіржавіючих і жароміцних сталей. Для інструментів чистової обробки використовують ванадієві сталі (Р9Ф5, Р14Ф4), а для чорнової обробки – вольфрамомолібденові (Р9М4, Р6М3, Р6М5).

Тверді металокерамічні сплави мають високу твердість, стійкість проти спрацювання, міцність, теплостійкість близько 900...1000°C. Використовують їх для високопродуктивної обробки зі швидкістю різання до 800 м/хв. Тверді сплави виготовляють спіканням при 1500...1900 °C з дисперсних порошків карбідів (WC, TiC, TaC) і порошку кобальту.

Тверді сплави поділяють на три групи: вольфрамові (ВК), титановольфрамові (ТК) і титанотанталовольфрамові (ТТК). Додаткові літери

В і М у кінці марки сплаву вказують на дисперсність вихідного порошку відповідно 3...5 і 0,5 – 1,5 мкм. Зі сплавів групи ВК виготовляють інструменти для обробки чавунів, кольорових металів і пластмас; групи ТК – для обробки сталей та інших в'язких матеріалів, зі сплавів групи ТТК – для чорнової обробки сталей. Для цього використовують і значно дешевші безвольфрамкові тверді сплави (БТТС) на основі карбідів і карбідо-нітридів титану з нікель-молібденовою зв'язуючою фазою.

Мінералокерамічні матеріали забезпечують інструменту ще більші різальні властивості, високу теплостійкість і швидкість різання. Основою мінералокерамічних матеріалів є порошок оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ , з якого шляхом пресування і наступного спікання виготовляють пластини потрібних розмірів і форми. Пластини ці закріплюють на держаках різального інструмента. Мінералокераміку використовують для чистової швидкісної обробки за умов відсутності ударних і згинаючих напружень. Добрі показники має мінералокераміка марки ЦМ-332.

За рівнем спеціалізації металорізальні верстати поділяють на:

- універсальні;
- спеціалізовані;
- спеціальні.

Універсальні призначені для виконання різноманітних операцій при виготовленні деталей, різних за розмірами і формою; спеціалізовані – для обробки однотипних деталей різних розмірів; спеціальні – для виготовлення деталей одного типорозміру.

За технологічними ознаками (залежно від характеру обробки) верстати поділяють на такі групи:

- токарні;
- свердлильні й розточувальні;
- шліфувальні, полірувальні, доводочні;
- для електрофізичної й електрохімічної обробки;
- зубо- і різьбообробні;
- фрезерні;
- стругальні, довбальні, протяжні;
- різні;
- різні.

Верстати кожної з цих груп поділяються на типи за такими основними ознаками:

- технологічне призначення (круглошліфувальні, плоскошліфувальні);
- конструктивні (універсально-фрезерні, поздовжньо-фрезерні);
- розташування робочих деталей у просторі (вертикально-свердлильні, горизонтально-свердлильні);
- кількість робочих деталей верстата (одношпиндельні, багатошпиндельні);



- ступінь автоматизації (з ручним керуванням, напівавтомати, автомати).

У промисловості найпоширеніші токарні, свердлильні, фрезерні та шліфувальні верстати.

Верстати токарної групи використовують для обробки циліндричних, конічних, фасонних (зовнішніх і внутрішніх) поверхонь обертання, а також для обробки площин, перпендикулярних до осі обертання заготовки. Для верстатів токарної групи основним інструментом є різець. На токарно-гвинторізальних верстатах різцем наносять нарізи на циліндричних і конічних поверхнях, а також спіральні канавки на торцевих поверхнях заготовок. Для нанесення нарізів застосовують також плашки і мітчики, а для оброблення отворів – свердла, зенкери, розгортки.

У верстатах токарної групи використовується два види руху: обертальний рух заготовки (рух різання) і поступальний рух інструмента (рух подачі), що забезпечують безперервність процесу різання. Токарні різці класифікують за різними ознаками. За матеріалом різальної частини розрізняють різці сталеві, твердосплавні і мінералокерамічні. За конструкцією різці поділяють на суцільні та складні. Залежно від розташування головної різальної кромки розрізняють різці правосторонні й лівосторонні. Залежно від призначення (виду обробки) різці поділяють на прохідні, підрізні, відрізні, розточувальні, нарізні, канавочні, фасонні.

До верстатів токарної групи відносяться також карусельні, револьверні, автомати та напівавтомати.

На верстатах свердління та розточування виконують свердлення, зенкерування, зенкування, розточування отворів різцями, розвертування, цекування, нанесення нарізу мітчиком.

Свердління – найпоширеніший спосіб виготовлення отворів у суцільному матеріалі з використанням свердла. Збільшення вже існуючих отворів свердлом називають розсвердлюванням. Оброблення ж циліндричних литих, штампованих або попередньо просвердлених отворів зенкером для надання їм необхідної геометричної форми, розмірів і шорсткості поверхні називають зенкеруванням. Зенкер, що використовується для цього, має конструктивні елементи, подібні до свердла. Відміна лише в тому, що зенкер не має поперечного леза, а різальних лез у нього не два, а три або чотири. Отвори розточуються різцями при необхідності додержання точної співвісності отворів.

Оброблювання отворів з метою отримання точних розмірів і малої шорсткості називають розгорткою. Робоча частина інструменту розгортки, подібно до свердла, має заборний конус і калібруючу частину, далі за нею є ділянка зі зворотним конусом для зменшення тертя.

Зенкерування – це утворення циліндричних або конічних заглиблень у попередньо зроблених отворах під головки болтів, гвинтів тощо. Здійснюють зенкерування за допомогою циліндричних або конічних зенкерів (зенковок).

Цековка – це оброблення торцевих поверхонь під гайки, шайби й кільця з використанням ножів (пластин) або торцевих зенкерів.

При свердлінні використовують такі основні типи сверл: перові, спіральні, свердла для глибокого свердління та центровочні.

Швидкість різання (м/хв) під час свердління (зенкерування) отворів визначають з виразу

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (2.3)$$

де  $D$  – зовнішній діаметр свердла, мм;

$n$  – частота обертання,  $\text{хв}^{-1}$ .

Глибина різання при свердленні  $t$  дорівнює половині діаметра отвору:

$$t = \frac{D}{2}, \quad (2.4)$$

Подачу  $S$  визначають за формулою

$$S = C_s \cdot D^{X_s}, \quad (2.5)$$

де  $C_s$ ,  $X_s$  – коефіцієнти, що залежать від оброблюваного матеріалу, точності обробки і шорсткості поверхні. Значення  $C_s$ ,  $X_s$  наведені у довідниках.

Основні типи свердлильних верстатів: вертикально-свердлильні; радіально-свердлильні; багатошпиндельні; горизонтально-свердлильні; агрегатні та інші.

Фрезерування – це процес обробки металу різанням, під час якого інструмент (фреза) здійснює головний обертальний рух, а заготовка – поступальний або обертальний рух подачі. Лише в окремих випадках фреза здійснює, окрім головного, і рух подачі. Фрезерування – один з найпродуктивніших і найпоширеніших методів обробки різанням. На фрезерних верстатах обробляють горизонтальні, вертикальні й похилі площини, фасонні поверхні; фрезерують пази і шпоночні канавки, зубці прямозубчастих й гвинтових зубчастих коліс; набором фрез обробляють складні поверхні, виконують нарізи.

Фреза – це тіло обертання, на поверхні якого розміщені різальні зубці. Залежно від форми і призначення фрези поділяють на: циліндричні; торцеві; дискові; кінцеві; кутові; нарізні (різьбові); черв'ячні та інші.

За формою задньої поверхні зубців розрізняють фрези з гостро заточеними і затилованими зубцями (кут заточування відповідно до  $6^\circ$  і  $25^\circ$ ). За конструктивними ознаками фрези поділяють на суцільні та зі вставними зубцями (ножами). Суцільні фрези виготовляють переважно зі швидкорізальної сталі. Корпус фрез зі вставними ножами виготовляють з конструкційної сталі, а ножі – з твердих сплавів.

Встановити оптимальний режим різання, що впливає на продуктивність обробки, точність та шорсткість оброблюваної поверхні, можливо тільки у разі правильного вибору елементів режиму різання. Такими елементами є:

глибина різання, подача, швидкість різання, ширина фрезерування. Глибина різання  $t$  (мм) – товщина шару матеріалу, який знімає фреза за один прохід, виміряна перпендикулярно до оброблюваної поверхні (рис. 2.4).

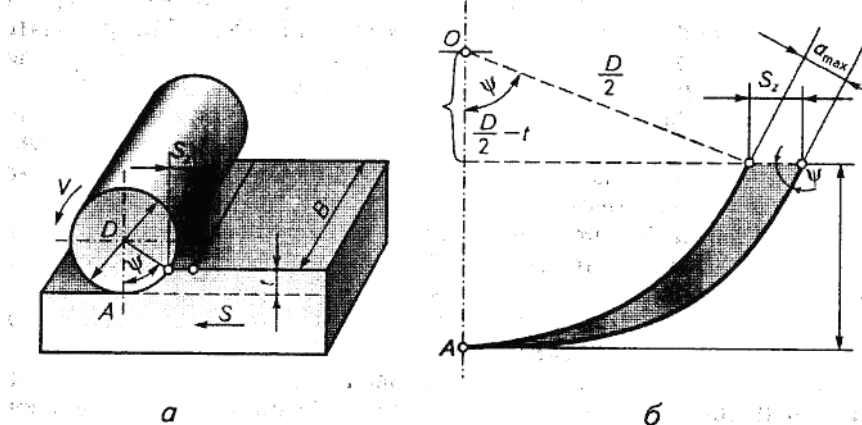


Рис. 2.4. Схема фрезерування

Подача – поступальне або обертаюче переміщення заготовки відносно осі фрези. При фрезеруванні розрізняють три розмірності подачі: подача на один зуб фрези  $S_z$  (мм/зуб) – переміщення заготовки відносно фрези за час її кутового повороту на один зуб; подача на один оберт фрези  $S_o$  – переміщення заготовки відносно фрези за один її оберт; подача за хвилину  $S_{xв}$  – переміщення заготовки відносно фрези за хвилину. Ці величини зв'язані між собою за формулою:

$$S_{xв} = S_o \cdot n = S_z \cdot z \cdot n, \quad (2.6)$$

де  $z$  та  $n$  – відповідно кількість зубів фрези та частота її обертання.

Швидкість різання  $V$  (м/хв) – швидкість найбільш віддаленої від осі обертання точки ріжучої кромки фрези:

$$V = \frac{\pi \cdot D}{1000}, \quad (2.7)$$

де  $D$  – діаметр фрези, мм.

Ширина фрезерування  $B$  – довжина поверхні контакту фрези з оброблюваною заготовкою, виміряна в напрямку, перпендикулярному напрямку подачі. Товщина шару, зрізаного при фрезеруванні, — це товщина шару металу, яка знімається одним зубом фрези, виміряна в радіальному напрямку. Зуб фрези зрізає стружку змінної товщини, для якої

$$a_{\max} = S_z \cdot \sin \psi, \quad (2.8)$$

де  $\psi$  – кут контакту.

Фрезерні верстати є найбільш поширеними металоріжучими верстатами. Існує багато типів фрезерних верстатів: консольно-фрезерні, поздовжньо-фрезерні, фрезерні верстати безперервної дії, шпоночно-фрезерні, різьбо-фрезерні, копірувально-фрезерні, спеціальні та інші. Найпоширеніші консольно- та поздовжньо-фрезерні верстати.

Стругання – це обробка поверхонь, яка виконується за наявності двох рухів: прямолінійного зворотно-поступального головного руху різця або заготовки в горизонтальній площині та переривчастого поступального руху подачі різця чи заготовки, перпендикулярного напрямку головного руху. При струганні процес різання переривчастий і стружка зрізається тільки при прямому (робочому) русі.

Стругальні верстати підрозділяють на два основних типи: поздовжньо-стругальні, на яких обробляють переважно середні та великі за розміром заготовки, та поперечно-стругальні, призначені для обробки заготовок при довжині стругання до 1 м. У поздовжньо-стругальних верстатів головним рухом є зворотно-поступальне переміщення стола з закріпленою на ньому заготовкою, а рухом подачі – періодичне переміщення різця в напрямку, перпендикулярному головному рухові. У поперечно-стругальних верстатах головним рухом є зворотно-поступальне переміщення різця, а рухом подачі при обробці горизонтальних площин – періодичне переміщення стола з заготовкою в напрямку, перпендикулярному напрямку руху різця. При обробці вертикальних або нахилених поверхонь періодичний рух подачі виконує супорт із закріпленим на ньому різцем.

Довбання – це вид стругання, але відрізняється від нього тим, що головний рух – зворотно-поступальне переміщення повзуна з вставленим у ньому різцем – здійснюється у вертикальній площині. Стіл верстата з заготовкою рухає подачу в горизонтальній площині в поздовжньому, поперечному або круговому напрямку. При струганні та довбанні як інструмент використовують різці. За формою стругальні різці подібні до токарних, але працюють як і довбальні, в більш тяжких умовах, оскільки в момент врізання відбувається удар.

Протягування – це високопродуктивний та високоточний метод обробки різанням наскрізних отворів та зовнішніх лінійних поверхонь, здійснюваний протяжками.

Протяжка – це багатолезові різальний інструмент, форма якого відповідає формі обробленого отвору або зовнішній поверхні. Висота кожного послідовного ріжучого зуба протяжки більша за висоту попереднього, і кожний зуб зрізає з оброблюваної поверхні стружку невеликої товщини. Розрізняють внутрішнє та зовнішнє протягання. При внутрішньому протяжку протягують через попередньо оброблений отвір заготовки. Залежно від форми поперечного перерізу протяжки одержують отвори різного профілю. Протяжки для зовнішнього протягання призначені для обробки зовнішніх плоских та лінійних фасонних поверхонь порівняно невеликої ширини.

**Приклад 2.1.** Визначити швидкість головного руху різання при обробці заготовки діаметром  $D = 120$  мм на токарному верстаті з частотою обертання шпинделя  $n = 500$  хв<sup>-1</sup>.

**Розв'язування.** Швидкість головного руху різання при точінні розраховується за формулою:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}.$$

Підставляючи числові значення  $D$  та  $n$  у вищенаведену формулу, отримаємо

$$V = \frac{3,14 \cdot 120 \cdot 500}{1000} = 189 \text{ м / хв} \approx 3,2 \text{ м / с}.$$

**Приклад 2.2.** Розрахувати частоту обертання шпинделя верстата при обточуванні заготовки діаметром  $D=80$  мм на токарному верстаті зі швидкістю головного руху різання  $V = 215 \text{ м / хв} \approx 3,6 \text{ м / с}$ .

**Розв'язування.** Частота обертання шпинделя токарного верстата визначається за формулою

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}.$$

Підставляючи числові значення  $D$  та  $V$  у вищенаведену формулу, отримаємо

$$n = \frac{1000 \cdot 215}{3,14 \cdot 80} = 860 \text{ хв}^{-1}.$$

**Приклад 2.3.** Визначити швидкість руху подачі  $V_s$  при обточуванні заготовки на токарному верстаті з частотою обертання шпинделя  $n=1000 \text{ хв}^{-1}$ ; подача різця за один оберт шпинделя становить  $S_o=0,26 \text{ мм/об}$ .

**Розв'язування.** Швидкість руху подачі різця визначимо за формулою

$$V_s = S_o \cdot n.$$

Підставляючи числові значення  $S_o$  та  $n$  у вищенаведену формулу, отримаємо

$$V_s = 0,26 \cdot 1000 = 260 \text{ мм / хв}.$$

**Приклад 2.4.** Розрахувати глибину різання  $t$  при обточуванні заготовки діаметром  $D=150$  мм на токарному верстаті у два переходи. При попередній обробці заготовка обточується до діаметра  $D_o=142$  мм, а при кінцевій – до  $d=140$  мм.

**Розв'язування.** При повздовжньому точінні циліндричної поверхні глибина різання визначається як

$$t = \frac{D_z - D_{o.n.}}{2},$$

де  $D_z$  – діаметр заготовки, мм;

$D_{o.n.}$  – діаметр обробленої поверхні, мм.

При попередній обробці діаметр заготовки становить  $D_3 = D = 150$  мм, а діаметр оброблюваної поверхні –  $D_{o.n.} = D_0 = 142$  мм. Підставляючи значення діаметрів заготовки та обробленої поверхні, отримаємо

$$t = \frac{150 - 142}{2} = 4 \text{ мм.}$$

При кінцевій обробці діаметр заготовки становить  $D_3 = D_0 = 142$  мм, а діаметр оброблюваної поверхні –  $D_{o.n.} = d = 140$  мм. Підставляючи значення діаметрів заготовки та обробленої поверхні, отримаємо

$$t = \frac{142 - 140}{2} = 1 \text{ мм.}$$

**Приклад 2.5.** Розрахувати потужність  $N_{piz}$ , яка витрачається на різання та момент опору різанню  $M_{o.p.}$ , якщо при повздовжньому точінні заготовки діаметром  $D = 70$  мм зі швидкістю головного руху різання  $V = 140 \text{ м/хв} \approx 2,3 \text{ м/с}$  головна складова сили різання становить  $P_z = 3100$  Н.

**Розв'язування.** Потужність, яку необхідно затратити на різання розрахуємо за формулою

$$N_{piz} = P_z \cdot V.$$

Підставляючи значення для  $P_z$  та  $V$ , отримаємо

$$N_{piz} = 3100 \cdot 2,3 = 7120 \text{ Вт} = 7,12 \text{ кВт.}$$

Момент опору різанню визначимо за формулою

$$M_{o.p.} = P_z \cdot \frac{D}{2}.$$

Підставляючи значення для  $P_z$  та  $D$ , отримаємо

$$M_{o.p.} = 3100 \cdot \frac{70}{2} \cdot 10^{-3} = 108,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

### **Завдання для самостійного виконання**

**Завдання 2.1.** Описати схему та технологію обробки заготовки на верстаті заданого типу. Тип верстата, відповідно до останньої цифри номера залікової книжки взяти із таблиці 2.1.

**Завдання 2.2.** Визначити швидкість головного руху різання при обробці заготовки діаметром  $D$  на токарному верстаті з частотою обертання шпинделя  $n$ . Числові значення  $D$  та  $n$  отримати з таблиці 2.2.

**Завдання 2.3.** Розрахувати частоту обертання шпинделя верстата при обточуванні заготовки діаметром  $D$  на токарному верстаті зі швидкістю головного руху різання  $V$ . Числові значення  $D$  та  $V$  отримати з таблиці 2.3.

**Завдання 2.4.** Визначити швидкість руху подачі  $V_s$  при обточуванні заготовки на токарному верстаті з частотою обертання шпинделя  $n$  та

подачею різця за один оберт шпинделя становить  $S_o$ . Числові значення  $n$  та  $S_o$  отримати з таблиці 2.4.

**Приклад 2.5.** Розрахувати глибину різання  $t$  при обточуванні заготовки діаметром  $D$  на токарному верстаті у два переходи. При попередній обробці заготовка обточується до діаметра  $D_0$ , а при кінцевій – до  $d$ . Числові значення  $D$ ,  $D_0$  та  $d$  отримати з таблиці 2.5.

Таблиця 2.1

Остання цифра номера залікової	Тип верстата
0	Токарний карусельний
1	Токарний револьверний
2	Токарнийавтомат
3	Токарний напівавтомат
4	Вертикально свердлильний
5	Радіально свердлильний
6	Багатошпиндельний свердлильний
7	Горизонтально свердлильний
8	Консольно фрезерний
9	Фрезерний безперервної дії

Таблиця 2.2

Остання цифра номера залікової	$D$ , мм	$n$ , хв <sup>-1</sup>
0	80	860
1	150	315
2	45	1600
3	70	1250
4	220	250
5	180	315
6	30	2000
7	95	630
8	110	400
9	60	1000

Таблиця 2.3

Остання цифра номера залікової	$D$ , мм	$V$	
		м/хв	м/с
0	140	88	1,47
1	37	233	3,89
2	90	177	2,95
3	120	119	1,98
4	72	280	4,67
5	64	200	3,33
6	160	80	1,33
7	54	170	2,84
8	43	216	3,6
9	210	133	2,22

Таблиця 2.4

Остання цифра номера залікової	$n$ , хв <sup>-1</sup>	$S_o$ , мм/об
0	400	0,61
1	630	0,43
2	200	0,87
3	315	0,7
4	250	0,78
5	1600	0,17
6	860	2000
7	160	630
8	1250	400
9	500	1000

Таблиця 2.5

Остання цифра номера залікової	$D$ , мм	$D_0$ , мм	$d$ , мм
0	188	182	180
1	67	61,5	60
2	56	54	50
3	120	114	112
4	95	88,5	87
5	87	81,5	80
6	216	208	206
7	50	43,5	42
8	140	132	130
9	73	66,5	65

**Завдання 2.6.** Розрахувати потужність  $N_{\text{різ}}$ , яка витрачається на різання та момент опору різанню  $M_{o.p.}$ , якщо при повздовжньому точінні заготовки діаметром  $D$  зі швидкістю головного руху різання  $V$  головна складова сили різання становить  $P_z$ . Числові значення  $D$ ,  $P_z$  та  $V$  отримати з таблиці 2.6.

Таблиця 2.5

Остання цифра номера залікової	$D$ , мм	$V$ , м/с	$P_z$ , Н
0	140	1,25	2750
1	160	2,16	2200
2	65	3,00	3000
3	45	4,00	1050
4	90	1,06	3600
5	70	1,83	3200
6	220	0,00	4000
7	85	4,42	600
8	110	1,50	3250
9	30	2,50	500



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3

### ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ ТИСКОМ

Обробка деталей тиском ґрунтується на використанні пластичної деформації матеріалів, тому, в основному, обробці тиском підлягають пластичні матеріали. Операції обробки тиском відбуваються без знімання стружки, а зміна форми зумовлена дією на заготовку зовнішніх сил від інструменту і оснастки. Основними видами обробки деталей тиском є прокатування, пресування, волочіння, кування і штампування.

У сучасні електротехнічній промисловості значну частину виробів виготовляють методом штампування. До переваг листового штампування відносяться:

- висока продуктивність, що приводить до низької вартості деталей;
- можливість використання малокваліфікованих робітників;
- порівняно невеликі втрати матеріалу при правильній побудові технологічного процесу і розкрою матеріалу;
- взаємозамінність деталей внаслідок високої точності і одноманітності;
- можливість отримання досить міцних, жорстких, але легких конструкцій при малій матеріаломісткості;
- передумови для механізації та автоматизації технологічного процесу.

Всі операції листового штампування поділяють на чотири групи;

1) *роз'єднувальні* – відділення однієї частини матеріалу від іншої по замкнутому чи незамкнутому контурі;

2) *формозмінючі* – зміна форми заготовки в процесі штампування, при якій плоска чи пустотіла заготовка перетворюється у просторову деталь заданої форми без зміни товщини заготовки або з її потоншенням;

3) *комбіновані* – суміщення кількох технологічних операцій штампування в одну (наприклад, пробивка+відрізання+згинання);

4) *збиральні* – операції для з'єднання кількох деталей в один вузол (наприклад, запресовка, клепаання, закатування).

До роз'єднувальних операцій відносяться:

*Відрізання* – повне відділення частини матеріалу по незамкнутому контурі.

*Вирубування* – повне відділення матеріалу по замкнутому контурі, відокремлена частина заготовки є готовим виробом;

*Пробивання* – отримання отвору шляхом відокремлення частини матеріалу пі замкнутому контурі. На відміну від вирубування при пробиванні частина матеріалу, що проштовхується крізь матрицю, є відходом, а частина, що залишилась, – виробом;

*Надрізання* – часткове відділення матеріалу по незамкнутому контурі без видалення залишків;

*Розрізання* – розділення заготовок на кілька окремих деталей;

*Обрізання (обрубівання)* – повне відділення лишнього матеріалу по зовнішньому контурі виробів. Від вирубування відрізняється конструкцією штампа.

*Зачистка* – невелике обрізання передбачених припусків на плоских заготовках з метою отримання точних розмірів і форми. Якщо зачистку проводять одночасно з вирубуванням (пробиванням) одними матрицею і пуансоном, то така обробка є чистовим вирубуванням (пробиванням).

*Просічка* – відокремлення листових неметалевих деталей по замкнутому контурі за допомогою просічних ножових штампів.

Операції розрізання широких заготовок на заготовки, з яких беспосередньо виготовляють деталі, називаються заготівельними. При цьому найчастіше використовують рулонний матеріал завтовшки 0,5 – 1,5 мм (шириною до 1,5 м), різання якого здійснюють за допомогою ножиць.

При роботі *ножиць з паралельними ножами* (рис. 3.1 а) матеріал, поміщений між ножами, піддається вертикальному тиску, що збільшується від 0 до значення, рівного опору металу зрізування, внаслідок чого відбувається відділення частини матеріалу. Кут різання  $\delta=90^\circ$ . Зусилля різання визначається з формули

$$P = kbs\tau_0, \text{ Н},$$

де  $k=1\div 3$  – коефіцієнт, що враховує затуплення ріжучих кромek, зміну величини зазору, якість матеріалу і т.д.;

$b$  – ширина полоси (периметр відрізання), м;

$s$  – товщина матеріалу, м;

$\tau_0$  – опір різанню, Па.

Для зменшення зусилля різання застосовують *ножиці з нахиленими ножами (гільйотинні ножиці)* (рис. 3.1, б). При цьому відрізання відбувається не по всій ширині листа одночасно, а поступово від одного краю до іншого. Тому зусилля різання залишається постійним і не залежить від ширини листа. Для зменшення тертя задніх поверхонь ножа об метал задній кут  $\alpha=1,5 - 3^\circ$ . Кут різання  $\delta=75 - 85^\circ$  для твердих матеріалів і  $\delta=67 - 70^\circ$  – для м'яких. Зусилля різання для гільйотинних ножиць:

$$P = k \frac{0,5s^2\tau_0}{\text{tg}\varphi},$$

де  $\varphi$  – кут нахилу ріжучої кромки ножа.

При різанні нахиленими ножами виникають додаткові деформації від розсування частин листа і відгинання його вниз. Тому кут  $\varphi$  звичайно менший від  $9^\circ$  (на практиці  $\varphi=4 - 6^\circ$ ).

Різновидом гільйотинних ножиць є вібраційні ножиці, у яких нижній нахилений ніж закріплений у станині нерухомо, а верхній ніж здійснює зворотно-поступальний рух. Число подвійних ходів верхнього ножа складає 1200 – 2500 ходів за хвилину,  $\varphi=24 - 30^\circ$ . Вібраційні ножиці

застосовують для різання криволінійних контурів з радіусами заокруглення не менше 12 – 15 мм, наприклад, для отримання заготовок осесиметричних відбивачів. До недоліків вібраційних ножиць відносяться можливість розрізати матеріал малої товщини (до 3 мм), швидке зношування ножів, низька чистота обробки поверхні вирізаної заготовки.

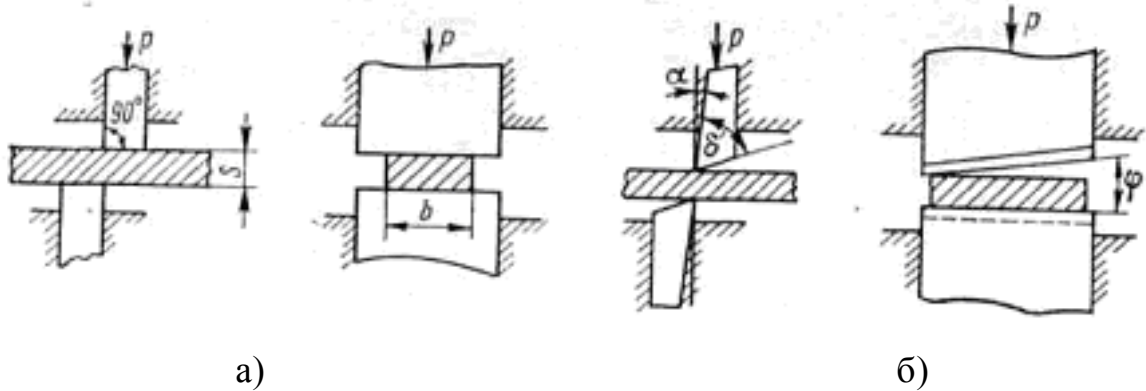


Рис. 3.1. Схема різання листового матеріалу ножицями:  
а) – з паралельними ножами; б) – з нахиленими ножами.

Процес різання металу дисковими ножицями (рис. 3.2) здійснюється круглими ножами, що обертаються в різні сторони з однаковою кутовою швидкістю. Матеріал переміщується завдяки тертю металу об ножі. За кількістю ножів дискові ножиці ділять на одно дискові, парно дискові і багатодискові з прямими і нахиленими (одним чи двома в парі) ножами.

У верстаті до станини 1 вмонтовано рухомі вали 2. Між дисковими ножами 4 закріплено розпирні втулки 3, довжина яких визначає розмір заготовки. Кутова швидкість дискових ножиць досягає 1,5 м/с, завдяки чому продуктивність їх роботи є високою. Верстат з ножицями нерідко оснащений спеціальним пристроєм, що перемотує вже розрізаний матеріал на секційні котушки і запускає у подальше виробництво.

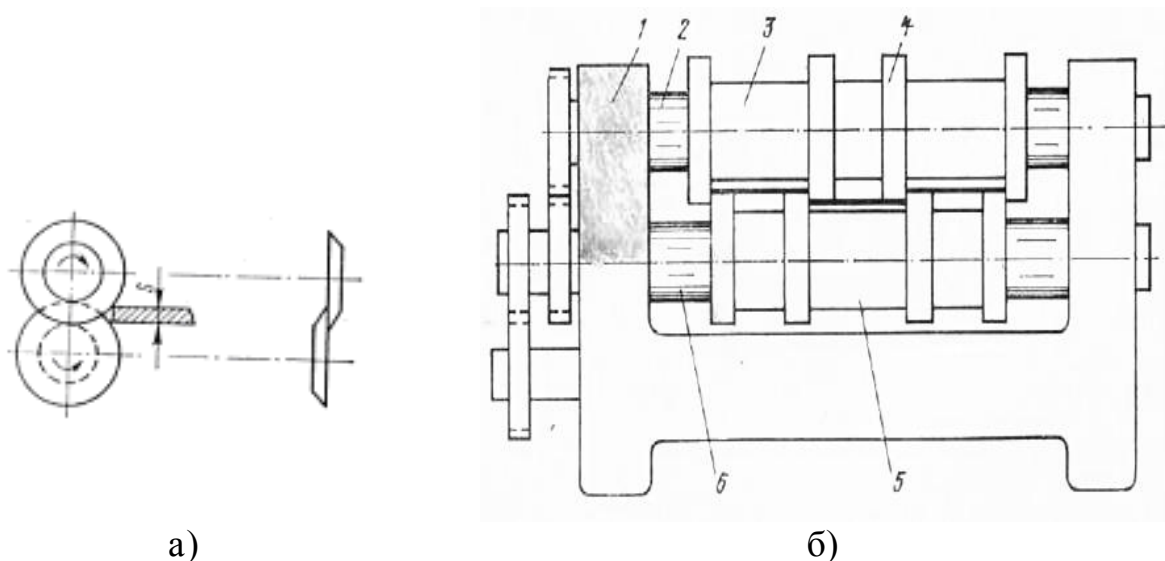


Рис. 3.2. Різання листового матеріалу дисковими ножицями:  
а) – схема різання; б) – вигляд установки.

Зусилля різання дисковими ножицями:

$$P = k \frac{0,5s^2\tau_0}{2tg\varphi}.$$

Кут захвату  $\varphi = 10 - 14^\circ$ .

Потужність приводу дискових ножиць:

$$N = \frac{0,064s^2\tau_0v}{\eta},$$

де  $v$  – швидкість різання, м/с;

$\eta = 0,7 - 0,8$  – ККД ножиць.

Вирубування деталей та пробивання в них отворів здійснюється за допомогою вирубних штампів, що представляють собою інструмент, у якого контур різальних частин – пуансон і матриця – відповідає контуру вирубної деталі або пробивного отвору (рис. 3.3).

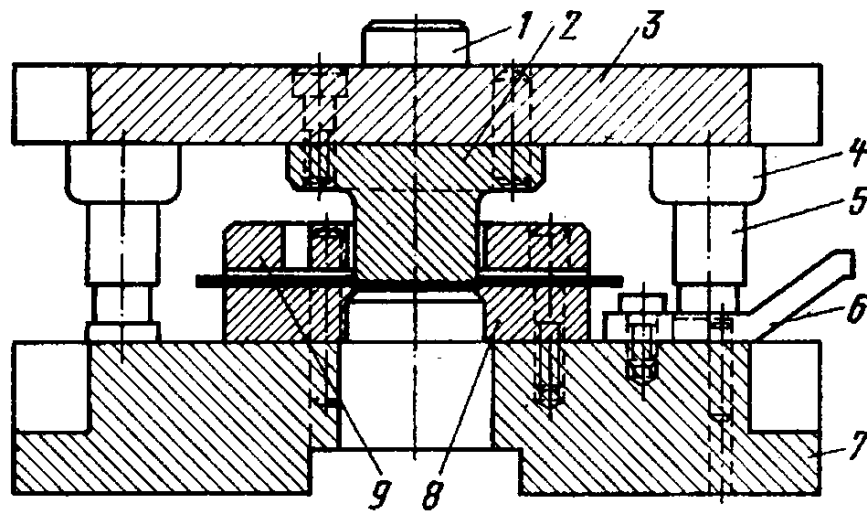


Рисунок 5.4 – Вирубний штамп.

Деформуюче зусилля штампу здійснюється пуансоном 2, який кріпиться гвинтами до рухомої плити 3, що утримується на повзуні преса фіксатором 1. На нижній плиті 7 розміщена матриця 8. Заготовка притискається до матриці притискачем 9. Для обмеження ступенів свободи ходу пуансона у верхню плиту запресовано втулки 4, що вільно переміщуються вздовж спрямовуючих колонок 5. При ході повзуна преса вниз матеріал протискується пуансоном у матрицю. Процеси вирубування та пробивання складаються з чотирьох основних моментів: пружне стискання, стискання з вигинанням і видовженням, поява сколів та відокремлення деталі від оброблюваного матеріалу.

Для нормальної роботи вирубного штампу між його робочими частинами пуансоном і матрицею необхідні зазори. При роботі штампу кромки робочих частин на пуансоні та на матриці з часом затупляються, і на

них утворюються заокруглення, що викликає поступове збільшення зусиль вирубування чи пробивання. При затупленні робочих частин збільшуються також загусениці на кромках деталей. Зазори встановлюють залежно від товщини і механічних характеристик штампованого матеріалу. Від величини зазору залежать якість поверхні зрізу вирубної деталі та стійкість штамів. Малий зазор утворює у верхній частині деталі за гусениці через розривання металу, великий – рвані краї через затягування в нього металу.

Для зменшення зусилля різання використовують нестандартні ріжучі інструменти: при вирубуванні деталей скіс роблять на матриці, а торець пуансона виготовляють плоским; при пробиванні отворів торець матриці виготовляють плоским, а скіс роблять на пуансоні.

Вирубування деталей здійснюють на вирубних штампах, які класифікуються за трьома основними ознаками: конструктивною, технологічною, експлуатаційною.

За технологічною ознакою штампи поділяють на прості (виконується лише одна операція) і комбіновані (декілька операцій). Комбіновані штампи розділяють на сумісні (або компаундні) і послідовні. Сумісними штампами називають такі, в яких на одній робочій позиції об'єднані різні технологічні операції і за один хід преса виробляється готова деталь чи напівфабрикат.

Розміри деталі визначаються розмірами робочих інструментів штампу і не залежать від точності подання стрічки. Послідовні штампи являють собою сукупність різних операційних штамів, об'єднаних у спільному блоці, в межах якого заготовка пересувається з позиції на позицію разом із стрічкою. Відокремлення виробу здійснюється на останній операції. Розміри деталі, виробленій на послідовному штамі, визначаються не тільки станом інструмента, але й точністю подання матеріалу до робочої зони. Тому при послідовній штампівці деталей рекомендується передбачати у штампах додаткову фіксацію стрічки. Послідовна штампівка дозволяє застосовувати високошвидкісні преси (250-400 ходів за хвилину), що забезпечує її високу продуктивність. Такої переваги позбавлена компаундна штампівка (швидкість руху преса не перевищує 70 ходів за хвилину). У серійному світлотехнічному виробництві впроваджено УЗШ (універсальні збірні штампи), що при необхідності можуть модернізуватись у штамп будь-якого типу.

За конструктивною ознакою штампи бувають відкритого або закритого типу. Відкриті штампи використовують тільки в дослідному виробництві. Вони найпростіші за конструкцією, але це їх єдина перевага в порівнянні з іншими. Хід пуансона в таких штампах ніщо не спрямовує, отже точність вирубки деталей у них мала, крім того робочі елементи швидко псується, ці штампи небезпечні для робочого персоналу. У закритих штампах рухома плита не має зайвих ступенів свободи. Вони забезпечують високу точність і мале спрацювання обладнання. Ці штампи розрізняють на блочні (рух

пуансона обмежується спрямовуючими колонками) і пакетні (обмеження площиною, поперечною до матриці).

За експлуатаційною ознакою штампи є з ручним і автоматичним поданням матеріалу в робочу зону. Серед автоматизованих штамів найбільшого розповсюдження набули штампи з валковим поданням матеріалу (згорнутим у рулон). При робочому ході пуансона (вниз) валки (дві пари зверху листа заготовки і дві пари знизу) не обертаються і працюють на фіксацію заготовки. При зворотному ході спрацьовує система передач, і валки починають обертатися. Їх рух просуває рулонний матеріал на певну (відрегульовану) відстань. Ця схема набула широкого застосування при штампуванні деталей з металевої стрічки. Валкова штамповка також зручна для нанесення мастила на робочі елементи преса, що зменшує їх спрацьовування. Для цього достатньо пропускати стрічку через посудину з мастилом (нижні валки мають бути занурені в мастило, а верхні – ні). При перемотуванні рулону мастило постійно наноситься на матрицю з пуансоном.

Зусилля, необхідне для вирубування чи пробивання деталі будь якої конфігурації, визначають за формулою:

$$P = k u s \tau_0, \text{ Н},$$

де  $k = 1 \div 3$  – коефіцієнт, що враховує затуплення ріжучих кромek, зміну величини зазору, якість матеріалу і т.т.;

$u$  – довжина контуру (периметр) деталі, що відрізається, м;

$s$  – товщина матеріалу, м;

$\tau_0$  – опір різанню, Па.

**Приклад 3.1.** Для деталі, креслення якої зображено на рис. 5.5, виконати наступне:

- 1) аналіз конструктивних особливостей деталі;
- 2) вибір листового прокату та розробка схеми розкрою матеріалу;
- 3) розрахунок коефіцієнта використання матеріалу;
- 4) визначення зусилля формоутворення та затраченої роботи;
- 5) розрахунок центру тиску штампа
- 6) вибір зазорів та розмірів пуансона та матриці.

#### **Розв'язування.**

##### **1. Аналіз конструктивних особливостей деталі**

Деталь „Планка-фіксатор” призначена для закріплення відбивача, розсіювача, скляного ковпака або інших складових елементів габаритного світлотехнічного обладнання загального призначення (прожектор, ліхтар).

Технічні вимоги на виготовлення даної деталі регламентують марку матеріалу, шорсткість оброблюваних поверхонь, квалітет точності та припуски на розміри і товщину листа прокату.

Загальна шорсткість оброблюваних поверхонь повинна відповідати 6-му класу  $Ra = 2,5$ . Усі розміри оброблюваних поверхонь, крім

центрувального й кріпильного отворів, виконуються за 14-м квалітетом точності. Товщина листового матеріалу – 2 мм.

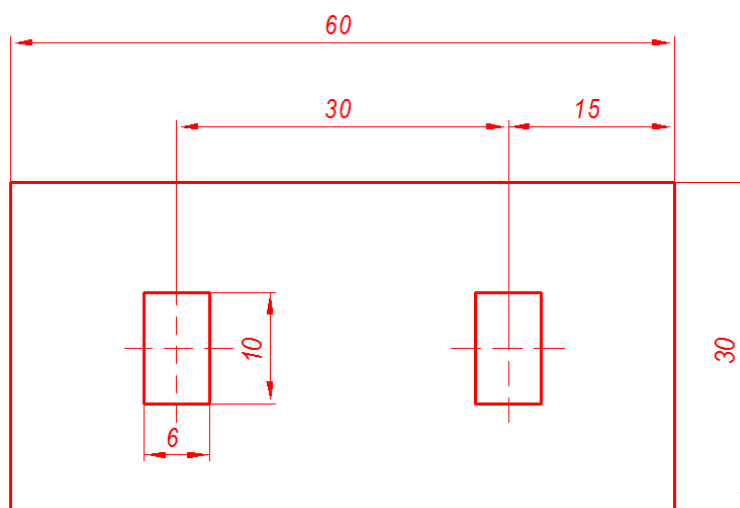


Рис. 3.5. Креслення деталі

Для виготовлення деталі використовують сталь ВСтЗкп. Даний матеріал відноситься до вуглецевих конструкційних сталей звичайної якості, механічні властивості й хімічний склад яких регламентуються згідно з ГОСТом 380-88. Степінь розкислення – кипляча (кп). Порядковий номер маркування сталі (3) вказує порядок зростання вмісту вуглецю і підвищення характеристик міцності. В сталях даного класу допускається порівняно високий вміст різних домішок.

Сталь СтЗ буває групи А (постачання за механічними властивостями), групи Б (постачання за хімічним складом) і групи В (постачання за механічними властивостями і додатковими вимогами до хімічного складу).

Сталь ВСтЗкп є найпоширенішою у промисловості завдяки своїм задовільним механічним і хімічним властивостям та одночасній відносно низькій ціні.

Хімічні і механічні властивості матеріалу ВСтЗкп наведено у таблицях 3.1 та 3.2 [4].

Таблиця 3.1. Хімічний склад вуглецевої сталі звичайної якості (ГОСТ 380 – 88)

Марка матеріалу	Вміст хімічних елементів						
	C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %
				не більше			
ВСтЗкп	0,14÷0,22	0,30÷0,65	0,07	0,05	0,04	0,3	0,3

Аналізуючи конструктивні особливості деталі можна зробити висновок, що конфігурація зовнішнього контуру є простою й не викликає ніяких труднощів при обробці.

Точність розмірів і шорсткість поверхонь даної деталі забезпечується вирубкою і не потребують подальшої механічної обробки. Деталь

„Планка-фіксатор" завдяки своїм габаритним розмірам можна обробляти з середньою точністю штампування (5-7-й класи) як на роздільних, так і на послідовно діючих штампах.

Отже, даний вибір є високотехнологічним і простим за конструкцією й допускає високопродуктивні методи обробки.

Таблиця 2. Механічні властивості вуглецевої сталі звичайної якості (ГОСТ 380 – 88)

Марка матеріалу	Параметри		
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %
ВСтЗкп	360÷460	235	27

## 2. Вибір листового прокату та розробка схеми розкрою матеріалу.

Для виготовлення деталі із асортименту листового матеріалу вибираємо лист розмірами 1000×2000 мм.

Перед штампуванням доцільно провести розкрій листового матеріалу. При штампуванні невеликих деталей, якою є даний виріб, найбільш раціональним є багаторядний розкрій. Попереднє розрізання листа на смугу здійснюється на гільйотинних ножицях.

Зусилля, яке необхідно прикласти для різання матеріалу визначаємо за формулою

$$P = k \frac{0,5s^2\tau_0}{\operatorname{tg}\varphi}, \quad (3.1)$$

де  $k=1\div 3$  – коефіцієнт, що враховує затуплення ріжучих кромek, зміну величини зазору, якість матеріалу і т.д.;

$s$  – товщина матеріалу, м;

$\tau_0$  – опір різанню, Па.

$\varphi$  – кут нахилу ріжучої кромки ножа.

Для нашого випадку приймаємо  $k=1,5$ ,  $\varphi=4^\circ$ ,  $s=2$  мм,  $\tau_0=320$  МПа

[3]. Підставляючи числові значення у формулу (2.1), отримуємо

$$P = 1,5 \cdot \frac{0,5 \cdot 2^2 \cdot 320}{\operatorname{tg}4^\circ} = 10,97 \text{ кН.}$$

При розробці розкрою листового матеріалу використовуємо безвідходну схему розкрою, яка не потребує перемичок.

З метою зменшення кількості відходів розкрій доцільно проводити в поперечному напрямі. Кількість деталей  $n_d$ , що отримується з однієї смуги, можна визначити за формулою



$$n_{\partial} = \frac{B_1 - a}{A} = \frac{B - (a + c_1)}{D + a},$$

де  $B_1$  – ширина листа без відходів по ширині, мм;

$a$  – ширина перемички (в нашому випадку  $a = 0$ );

$A$  – крок подачі при вирубуванні, мм;

$B$  – повна ширина листа, мм;

$c_1$  – відходи по ширині листа, мм;

$D$  – діаметр або ширина деталі, що штампується, мм.

З [3] вибираємо  $c_1 = 20$ ,  $A = 60$ , отримуємо

$$n_{\partial} = \frac{2000 - 20}{60} = 33 \text{ шт.}$$

Кількість смуг, отриманих з листа визначаємо за формулою

$$n_n = \frac{L - m_1}{B_0},$$

де  $L$  – довжина листа без відходів, мм;  $L = 1000$ ;

$m_1$  – відходи по довжині листа, мм;  $m_1 = 10$ ;

$B_0$  – ширина смуги, мм;  $B = 30$ ;

Підставляючи дані в формулу (2), отримаємо

$$n_n = \frac{1000 - 10}{30} = 33 \text{ шт.}$$

Загальна кількість деталей визначається за формулою

$$N_{\partial} = n_n \cdot n_{\partial}$$

Для нашого випадку

$$N_{\partial} = 33 \cdot 33 = 1089, \text{ шт.}$$

### 3. Розрахунок коефіцієнта використання матеріалу.

Коефіцієнт використання матеріалу при поперечному розкроїли ста визначимо за формулою

$$\eta_{\text{л}} = \frac{N_{\partial} \cdot F_{\partial}}{F_{\text{л}}} \quad (3.2)$$

де  $F_{\partial}$  – корисна площа деталі, мм<sup>2</sup>;

$F_{\text{л}}$  – площа листа, мм<sup>2</sup>.

Загальна площа листа дорівнює

$$F_{\text{л}} = 1000 \cdot 2000 = 2000000 \text{ мм}^2.$$

Корисна площа деталі

$$F_{\partial} = 60 \cdot 30 - 6 \cdot 10 \cdot 2 = 1680 \text{ мм}^2.$$

Підставляючи дані у формулу (3.2), отримаємо

$$\eta_n = \frac{1089 \cdot 1680}{2000000} \cdot 100\% = 91,47\%.$$

#### 4. Визначення зусилля формоутворення та затрачуваної роботи

Технологічне зусилля різання при штампуванні визначимо за формулою

$$P_p = k \cdot u \cdot s \cdot \tau_0,$$

де  $k$  – поправочний коефіцієнт опору зрізу,  $k = 1 \dots 1,3$ ;

$u$  – довжина контуру (периметр) деталі, що вирубується, мм;

$s$  – товщина матеріалу листа (стрічки), мм;

$\tau_0$  – опір зрізу (вирубівання) при лабораторних (ідеальних) умовах, МПа.

Обробку даної деталі проводять на штампі послідовної дії, на якому попередньо пробивають два отвори, а потім відрізають пластини. Відповідно зусилля штампування на першому етапі обробки:

$$P_{p1} = 1,2 \cdot u_1 \cdot s \cdot \tau_0.$$

$$u_1 = 2 \cdot 2 \cdot a_1 + b_1 = 2 \cdot 2 \cdot 6 + 10 = 64 \text{ мм.}$$

$$\tau_0 = 320 \text{ МПа.}$$

Звідси зусилля пробивання

$$P_{p1} = 1,2 \cdot 64 \cdot 2 \cdot 320 = 49152 \text{ Н.}$$

Зусилля штампування на другому етапі обробки

$$P_{p2} = 1,2 \cdot u_2 \cdot s \cdot \tau_0.$$

$$u_2 = 30 \text{ мм.}$$

Зусилля вирубування

$$P_{p2} = 1,2 \cdot 180 \cdot 2 \cdot 320 = 23040 \text{ Н.}$$

Сумарне (максимальне) зусилля штампування

$$P = P_{p1} + P_{p2},$$

$$P = 49152 + 23040 = 72,2 \text{ кН.}$$

Затрачувану роботу різання при штампуванні можна визначити згідно формули

$$A_n = \frac{\lambda \cdot P \cdot s}{1000}$$

де  $\lambda$  – відношення середнього зусилля до максимального,  $\lambda = 0,5$ .

Звідси робота різання

$$A_n = \frac{0,5 \cdot 72192 \cdot 2}{1000} = 72,192 \text{ Дж.}$$

Зусилля проштовхування орієнтовно можна визначити за формулою

$$Q_{np} = (0,6 \div 0,7) \cdot u \cdot s \cdot \sigma_T \cdot \mu_{np},$$

де  $\sigma_T$  – межа текучості матеріалу, Мпа;

$\mu_{np}$  – коефіцієнт тертя при проштовхуванні,  $\mu_{np} = 0,2 \dots 0,3$ .

$$Q_{np} = 0,65 \cdot 64 \cdot 2 \cdot 235 \cdot 0,25 \approx 4,9 \text{ кН.}$$

Зусилля зняття деталі з пуансона

$$Q_{zn} = k_{zn} \cdot P,$$

де  $k_{zn}$  – поправочний коефіцієнт,  $k_{zn} = 0,07$ ;

$$P = P_{p1} = 49152 \text{ Н.}$$

Відповідно

$$Q_{zn} = 0,07 \cdot 49152 = 3440,64 \text{ Н.}$$

### 5. Розрахунок центру тиску штампа

Координати центру тиску штампа визначаються за формулами

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n u_i}, \quad y = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n u_i},$$

де  $u_i$  – довжина  $i$ -го контура, що пробивається або вирубуються;

$x_i, y_i$  – координати  $i$ -го контура, що пробивається або вирубуються;

$n$  – кількість контурів, що пробиваються або вирубуються

При штампуванні деталі з симетричним контуром центр тиску буде знаходитися в центрі контуру. В даному випадку отвори, що пробиваються є однаковими за розмірами, відповідно центр тиску штампа знаходиться на осі між отворами (рис. 3.6)

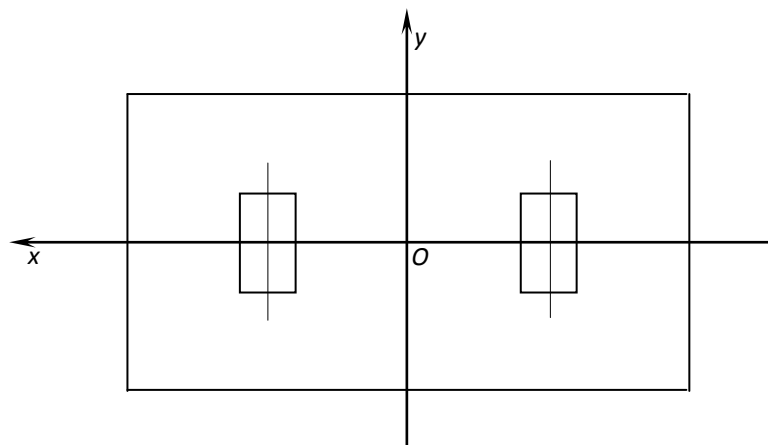


Рис. 3.6. Визначення центру тиску штампа

## 6. Вибір зазорів пуансона та матриці

Під час визначення робочих розмірів пуансонів та матриць для розділюючих операцій потрібно виходити з розмірів виробу, його точності та характеру спрацювання штампа. Визначимо розміри пуансона та матриці. Розмір пуансона

$$d_n = d_n + \Delta'_{-\delta_{\Pi}},$$

а розмір матриці

$$d_m = d_n + \Delta' + z_{\min}^{+\delta_M},$$

де  $d_m, d_n$  – розміри матриці і пуансона відповідно, мм;

$\Delta'$  – припуск на зношування інструменту, мм;

$\delta_M, \delta_{\Pi}$  – допуски на виготовлення пуансона і матриці, мм.

Допуски та припуски на розміри пуансона та матриці визначаємо згідно рекомендацій [3]. Припуск на зношування інструменту  $\Delta' = \Delta$ , де  $\Delta$  – допуск на розмір отвору,  $\Delta = 0,015$  мм.

Прийmemo  $z_{\min} = 0,18$  мм,  $\delta_M = 0,022$  мм,  $\delta_{\Pi} = 0,022$  мм;

Довжина матриці

$$a_m = 10 + 0,015 + 0,18^{+0,022} = 10,165^{+0,022} \text{ мм.}$$

Ширина матриці

$$b_m = 6 + 0,015 + 0,18^{+0,022} = 6,165^{+0,022} \text{ мм.}$$

Довжина пуансона

$$a_n = 10 + 0,015_{-0,022} = 10,015_{-0,022} \text{ мм.}$$

Ширина пуансона

$$b_n = 6 + 0,015_{-0,022} = 6,015_{-0,022} \text{ мм.}$$

### **Завдання для самостійного виконання**

**Завдання 3.1.** Для конкретної деталі виконати наступне:

- 1) аналіз конструктивних особливостей деталі;
- 2) вибір листового прокату та розробка схеми розкрою матеріалу при розмірі листа 1000 мм на 2000 мм;
- 3) розрахунок коефіцієнта використання матеріалу;
- 4) визначення зусилля формоутворення та затраченої роботи;
- 5) розрахунок центру тиску штампа;
- 6) вибір зазорів та розмірів пуансона та матриці.

Креслення та розміри деталі, а також параметри точності та шорсткості отримати індивідуально у викладача.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4

### ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ІЗ СВІТЛОПРОПУСКНИХ МАТЕРІАЛІВ

За своїм походженням світло пропускні матеріали поділяються на два класи: органічні та неорганічні. Одним із найбільш застосовуваних світло пропускних матеріалів є скло.

Скло являє собою переохолоджений розплав склоутворюючих окислів, що мають високу в'язкість. З погляду фізичних властивостей скло являє собою переохолоджену рідину, при затвердінні якої у процесі охолодження не відбувається утворення кристалів, тому що цьому перешкоджає швидке зростання в'язкості розплавленого скла при зниженні температури. При затвердінні розплаву утвориться гомогенна аморфна маса. Молекули немов “заморожуються” і зберігають у твердому стані таке ж положення, яке займали в розплаві. У чистому кварцовому склі, наприклад, присутні також групи  $\text{SiO}_4$ , як і у кристалах кварцу. При охолодженні, однак, утворюють не впорядковану кристалічну структуру, а нерегулярну й асиметричну кремнійкисневу сітку (рис. 4.1) [7].

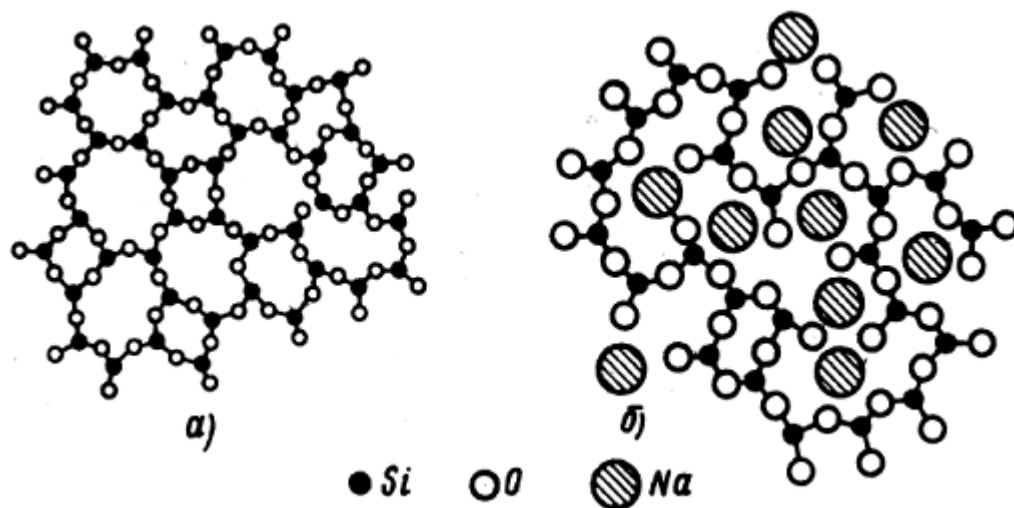


Рис. 4.1. Структура скла  
а) – кварцового; б) – натрій силікатного

Хоча склу може бути приписана певна структура, відсутність регулярності в повторенні її елементів на порівняно великому просторі не дозволяє вважати її кристалічною. Тому скло перебуває в термодинамічно нестійкому стані й має схильність до розскловування, тобто до утворення стабільних кристалів.

Цей процес можливий при досить тривалому нагріванні скла до високих температур, які не перевищують точку плавлення кристалів, що утворюються, при цьому в'язкість падає, та утворюються кристали. Скло стає зовсім непрозорим.

З технічної точки зору, скло являє собою неорганічний досить хімічно стійкий продукт плавлення окислів, який після охолодження твердий, крихкий, переважно прозорий, практично газонепроникний, він утворює при руйнуванні безформні ріжучі уламки. При частковому заміщенні кремнію в тетраедрах, наприклад на алюміній або бор, утвориться сітка алюмосилікатного або боросилікатного скла.

Іони лужних і лужноземельних металів (Ca, Ba, Li, Na, K) є модифікаторами. У структурній сітці скла вони розташовуються у проміжках тетраедричних групах  $\text{SiO}_4$ . Введення  $\text{Na}_2\text{O}$  або інших модифікаторів розриває міцні Si-O-Si зв'язки й знижує міцність, термостійкість, хімічну стійкість скла, але одночасно поліпшує технологічність, тобто полегшує виробництво стекол, має відносно пухку структуру, із внутрішніми неоднорідностями і поверхневими дефектами.

До складу неорганічних стекол входять склоутворюючі оксиди кремнію, бору, фосфору, германію, миш'яку, які утворюють структурну сітку скла, та окисли, що модифікують структуру скла, – натрію, калію, літію, кальцію, барію, які змінюють фізико-хімічні властивості скломаси. Крім цих оксидів, до складу скла вводять оксиди алюмінію, заліза, титану, берилію, цирконію та інші, які самостійно не утворюють структурний каркас, але можуть частково заміщувати склоутворюючі оксиди і цим змінювати властивості скла.

Таким чином, промислові стекла є складними багатокомпонентними системами.

Основними властивостями скла є:

- термічні (термічний коефіцієнт лінійного розширення, температура розм'якшення, питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, в'язкість);
- механічні (міцність);
- електричні (питомий опір, діелектричні характеристики);
- оптичні (коефіцієнт пропускання, показник заломлення);
- хімічні та вакуумні (стійкість до впливу кислот, лугів, парів води, металів, газопроникність).

Класифікують стекла за низкою ознак: за склоутворюючою речовиною, за вмістом модифікаторів, за призначенням, за температурним коефіцієнтом лінійного розширення.

Залежно від хімічного складу й основного склоутворюючого оксиду скла поділяють на:

I. Легкоплавкі:

- 1) малолужні свинцевосилікатні ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{PbO}$  складає 40-50%), де лугу менше 10%;
- 2) лужні свинцевосилікатні, де лугу більше 10%;  $\text{PbO}$  складає 20 – 35%;
- 3) лужні кальційсилікатні ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{CaO}$  складає 5 – 12 %), де лугу 13–20%.

II. Середньої температури плавлення:

- 1) кальційалюмосилікатні ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  складає 3,5 – 10%;  $\text{CaO}$  – 6–12%), де лугу до 23%;

2) алюмоборокальційсилікатні ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{B}_2\text{O}_3$  складає 3–8%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  складає 3,5–10%;  $\text{CaO}$  складає 6–12%), де лугу 8–23%;

3) алюмоборокальційцинксилікатні ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{B}_2\text{O}_3$  складає 3–8%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  складає 3,5 – 10%;  $\text{CaO}$  складає 3 – 12%;  $\text{ZnO}$  складає 3 – 7%), де лугу 8–14%.

III. Тугоплавкі стекла:

1) боросилікатні ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{B}_2\text{O}_3 \geq 10\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 3\%$ );

2) алюмоборосилікатні ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{B}_2\text{O}_3 - 5 - 21\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 3-20\%$ ), де лугу  $\leq 6\%$ ;

3) свинцевоборосилікатні ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{B}_2\text{O}_3 - 15-17\%$ ;  $\text{PbO} - 6\%$ ).

IV. Спеціальні стекла :

1) стекла зі слабкою опалесценцією фторкальційцинксилікатні;

2) боратні;

3) фосфатні;

4) алюмоборатні , алюмофосфатні й т.д.

Залежно від кількості лужних окислів стекла можуть бути легкоплавкі (з високим вмістом лужних оксидів, до 20 – 30%, які мають високий ТКРЛ) та тугоплавкі (обов'язково мають у своєму складі оксид бору та високий вміст  $\text{SiO}_2$ , за умови низького вмісту лужних оксидів).

За вмістом модифікаторів стекла поділяються на лужні, безлужні й кварцові. За призначенням: технічні, будівельні, побутові. За технічним призначенням можна підрозділити на: вакуумні, світлотехнічні, хімічні та ін. За ТКРЛ на групи: вольфрамову, молібденову, платинову, перехідну, кварцову, титанову, залізну.

Скло одержують спільним сплавленням низки сировинних матеріалів, узятих у певних вагових пропорціях. Процес виготовлення скла поділяється на дві частини:

1) підготовка сировинних матеріалів;

2) скловаріння.

Однорідну механічну суміш сировинних, підготовлену для завантаження в скловарну піч, називають скляною шихтою. У якості основної вихідної сировини можуть використовувати кварцовий пісок, соду, доломіт, барит, глинозем або каолін, мармурову крихту, польовий шпат, вапняк, поташ, свинцевий сурик. Крім цих компонентів використовують багато інших сполук для знебарвлення, фарбування, глушіння.

Для одержання однорідної за гранулометричним складом шихти необхідно підготувати всі сировинні матеріали. Характер підготовки залежить від природи й призначення матеріалу. Зазвичай підготовка сировинних матеріалів складається з наступних етапів:

- подрібнення;
- розпушування;
- сушіння;
- сортування та збагачення;
- готування шихти;
- гранулювання шихти;

- контроль якості;
- транспортування шихти.

Матеріал, що надходить на скляний завод у вигляді порошку переважно тільки просівають. Кускові матеріали (доломіт, вапняк) піддають дробленню, сушінню, тонкому мливу, просіюванню. Особливо складну підготовку проходить пісок, тому що він найбільш забруднений. Його очищують і збагачують за допомогою промивання, флотації, магнітної сепарації й хімічного очищення. Сушать і просівають.

Ретельно перемішану суміш шихти зі склобоек завантажують у скловарну піч і нагрівають до температури плавлення.

Скловарні печі бувають горшкові й у вигляді конверторних ван.

У технологічному процесі варіння виділяють 5 стадій:

- 1) силікатоутворення;
- 2) склоутворення;
- 3) просвітління;
- 4) гомогенізація;
- 5) охолодження.

Силікатоутворення починається при невисоких температурах близько 670 К. У результаті хімічних реакцій між складовими шихти утворюються силікати. При подальшому підвищенні температури відбувається розплавлення й взаємне розчинення силікатів – склоутворення. Стадія склоутворення закінчується перетворенням пінистого й непрозорого розплаву силікатів на прозору скломасу з безліччю газових бульбашок. Склomasу ще нагрівають до 1700К, в'язкість скла знижується, газові бульбашки виходять на поверхню. Склomasа перемішується та відбувається просвітління (звільнення від газових бульбашок) й гомогенізація (усереднення хімічного складу). Останньою стадією підготовки скломаси до вироблення є охолодження до температури 1200 – 1400 К, що забезпечує потрібну в'язкість скла [7].

Для виготовлення заготовок і деталей зі скла застосовуються різноманітні технологічні процеси: видування, витягування, пресування і відцентрове лиття. Майже всі методи обробки скла базуються на зміні його в'язкості при зміні температури [8].

У склі при нагріванні, охолодженні, механічному впливі виникають внутрішні напруження, які можуть бути тимчасовими і постійними (залишковими). Тимчасові напруження зникають при охолодженні скла. Залишкові напруження залишаються у склі й значно знижують їх характеристики: різко знижується міцність скляного виробу, скло робиться неізотропним, тобто властивості в різних напрямках скляної маси є різними.

Для ліквідації залишкових напружень застосовують відпал скла. Відпал – це спеціальна термічна обробка всього скляного виробу, яка полягає в нагріванні до такої температури, при якій частки скла стають рухливими, але скло ще не розм'якшується, і повільному охолодженні. Напруження зникають тим швидше, чим менша в'язкість скла.



Температуру, яка відповідає в'язкості  $10^{12}$  Па·с, називають найвищою температурою відпалу. Температуру, яка відповідає в'язкості близько  $10^{14}$  Па·с, називають найнижчою температурою відпалу. Весь процес відпалу ділиться на чотири стадії (рис. 4.2) та характеризується кривою відпалу.

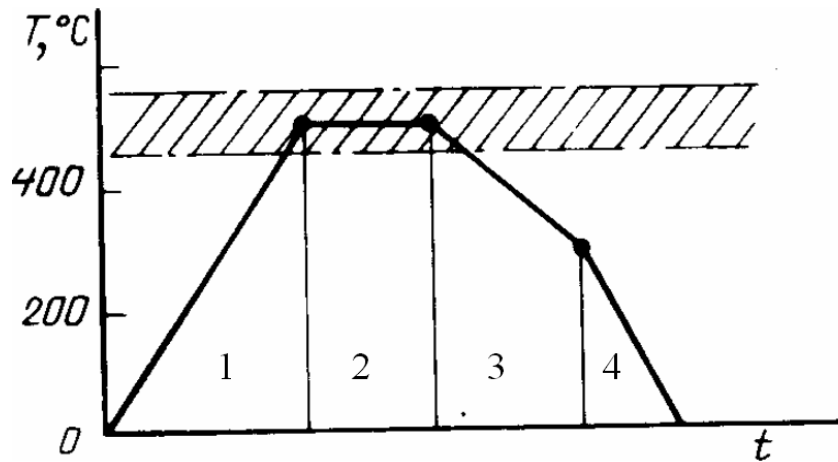


Рис. 4.2. Крива відпалу скла

Перша стадія – нагрівання або охолодження до температури відпалу. Якщо виріб має кімнатну температуру, то його поступово нагрівають, якщо ж він розігрітий вище температури відпалу даного скла, то його охолоджують до найвищої температури відпалу. При цьому швидкість  $V_1$  нагрівання або охолодження визначається за формулою [9]

$$V_1 = 20 \div 30 \cdot \frac{1}{a_{\max}}, \quad (4.1)$$

де  $a_{\max}$  – максимальна товщина стінки виробу.

Час нагріву або охолодження  $\tau_1$  визначається за формулами:  
при нагріві

$$\tau_1 = \frac{t_{\max} - t_{\text{с1}}}{V_1}, \quad (4.2)$$

при охолодженні

$$\tau_1 = \frac{t_{\text{с1}} - t_{\max}}{V_1}, \quad (4.3)$$

де  $t_{\text{с1}}$  – температура виробу перед відпалом;

$t_{\max}$  – найвища температура відпалу.

Друга стадія – витримка при найвищій температурі відпалу до зникнення напружень. Чим більшими є розміри виробу і товщина стінок, тим довшою є витримка при найвищій температурі відпалу.

Час витримки  $\tau_2$  визначається за формулою

$$\tau_2 = 70 \div 120 \frac{a_{\max}^2}{2}. \quad (4.4)$$

Зазвичай формула (4.4) має вигляд

$$\tau_2 = 102 \cdot \frac{a_{\max}^2}{2}. \quad (4.4)$$

Третя стадія – повільне охолодження до нижньої температури відпалу. Найголовніше – охолоджувати з досить малою швидкістю, щоб не виникли нові постійні напруження. Верхня температура відпалу молібденового скла знаходиться при 535 – 540 °С, до цієї температури його нагрівають на першій стадії відпалу і витримують; на третій стадії це скло повільно охолоджують до 410 °С – нижньої температури відпалу.

Швидкість охолодження  $V_3$  на третій стадії

$$V_3 = 1,33 \cdot a_{\max}^2. \quad (4.5)$$

Час охолодження:

$$\tau_3 = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{V_3}, \quad (4.6)$$

де  $t_{\min}$  – найнижча температура відпалу.

Четверта стадія – охолодження до кімнатної температури. При падінні температури нижче нижньої температури відпалу напружень у виробі не виникає, тому охолодження на даній стадії може проходити з досить великою швидкістю, практично із швидкістю остигання печі.

Швидкість охолодження на четвертій стадії

$$V_4 = 10 \div 15 \cdot \frac{1}{a_{\max}^2}. \quad (4.7)$$

Час швидкого охолодження

$$\tau_4 = \frac{t_{\min} - t_{e2}}{V_4}, \quad (4.8)$$

де  $t_{e2}$  – температура виробу після відпалу. Зазвичай приймається, що  $t_{e2} = 40$  °С.

Швидкість нагрівання на першій стадії і охолодження на четвертій визначається розміром і товщиною стінок виробів.

Формули (4.1) є справедливими при розрахунку параметрів відпалу тарного скла. При розрахунку листового скла замість  $a_{\max}$  використовують середню товщину листа  $a = \frac{a_{\max}}{2}$ .

Швидкість швидкого нагріву (охолодження) на першому етапі та повільного охолодження на третьому етапі можна розраховувати відповідно за формулами

$$V_1 = 20 \div 30 \cdot \frac{1}{a^2}, V_3 = 0,33 \cdot a^2. \quad (4.9)$$

Для визначення залишкових напружень у склі застосовують спеціальні прилади – полярископи, що випускаються промисловістю.

Відпал скляних виробів проводять в спеціальних печах; в заводських умовах – це камерні, вагонетні, муфельні, роликові, циркуляційні і вертикальні печі. В умовах складувних майстерень для відпалу скла застосовують електричні муфельні печі. Контроль і витримку скла в обумовленому інтервалі температур здійснюють за допомогою регулюючих приладів.

**Приклад 4.1.** Розрахувати найвищу та найнижчу температуру, а також режим відпалу тарного скла зі складом:  $\text{SiO}_2$  – 72,7%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 2,5%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,3%;  $\text{CaO}$  – 6,0%;  $\text{MgO}$  – 4,0%;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 14,5%. По результатам розрахунків побудувати криву відпалу. Прийняти:

температура виробу перед відпалом становить  $t_{\text{в1}} = 450$  °С;

температура виробу після відпалу  $t_{\text{в2}} = 40$  °С;

найнижча температура відпалу  $t_{\text{min}} = 450$  °С;

максимальна товщина стінки  $a_{\text{max}} = 0,5$  см.

**Розв'язування.** По даним таблиці 3 [ст. 289, 9] знайдемо склад скла, який є найближчий до заданого. Це скло із складом:  $\text{SiO}_2$  – 73%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 3%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,3%;  $\text{CaO}$  – 7,0%;  $\text{MgO}$  – 2,5%;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 14,5%. Найвища температура відпалу для даного скла дорівнює  $t_{\text{max1}} = 560$  °С.

З таблиці 4 [ст. 290, 9] видно, що 1%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при його вмісті в склі 0 – 5% підвищує температуру відпалу на 3 °С. В заданому складі скла міститься 2,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Отже, найвища температура відпалу буде знижена на  $\Delta t_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 3 \cdot 2,5 - 3 = -1,5$  °С.

1%  $\text{CaO}$  при його вмісті в склі 5 – 10% підвищує температуру відпалу на 6,6 °С. В заданому складі скла міститься 6%  $\text{CaO}$ . Отже, найвища температура відпалу буде знижена на  $\Delta t_{\text{CaO}} = 6,6 \cdot 6 - 7 = -6,6$  °С.

1%  $\text{MgO}$  при його вмісті в склі 0 – 5% підвищує температуру відпалу на 3,5 °С. В заданому складі скла міститься 2%  $\text{MgO}$ . Отже, найвища температура відпалу буде підвищена на  $\Delta t_{\text{MgO}} = 3,5 \cdot 4 - 2,5 = 5,25$  °С.

Вміст  $\text{Na}_2\text{O}$  в обох видах скла є однаковим, а вплив 0,3%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  не враховується. Тому найвищу температуру відпалу заданого складу скла можна розрахувати як

$$t_{\text{max}} = t_{\text{max1}} + \Delta t_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \Delta t_{\text{CaO}} + \Delta t_{\text{MgO}}.$$

Підставляючи числові дані у формулу, отримаємо

$$t_{\text{max}} = t_{\text{max1}} - 1,5 - 6,6 + 5,25 \approx 557 \text{ °С}.$$

Використовуючи формули (4.1) – (4.8) розраховуємо режими відпалу. Швидкість та час нагріву на першому етапі:

$$V_1 = \frac{25}{0,5} = 50 \text{ } ^\circ\text{C/хв}; \tau_1 = \frac{557 - 450}{50} = 2,1 \text{ хв.}$$

Час витримки на другому етапі

$$\tau_2 = 102 \cdot \frac{0,5^2}{2} = 6,4 \text{ хв.}$$

Швидкість та час охолодження на третьому етапі:

$$V_3 = \frac{1,33}{0,5^2} = 5,3 \text{ } ^\circ\text{C/хв}; \tau_3 = \frac{557 - 450}{5,3} = 20 \text{ хв.}$$

Швидкість та час охолодження на четвертому етапі:

$$V_4 = \frac{10}{0,5^2} = 40 \text{ } ^\circ\text{C/хв}; \tau_4 = \frac{450 - 40}{40} = 10,25 \text{ хв.}$$

По результатах розрахунків побудуємо криву відпалу (рис. 4.3).

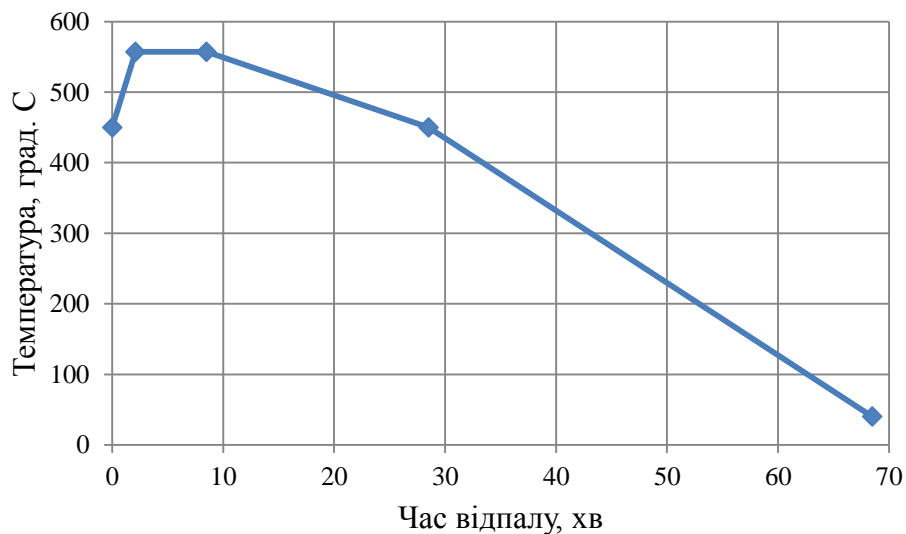


Рис. 4.3. Крива відпалу скла заданого складу

### ***Завдання для самостійного виконання***

**Завдання 4.1.** Розрахувати найвищу та найнижчу температуру, а також режим відпалу тарного та листового скла. Склад скла вибрати відповідно з таблицею 4.1. По результатам розрахунків побудувати криву відпалу. Прийняти:

температура виробу перед відпалом становить  $t_{e1} = 450 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

температура виробу після відпалу  $t_{e2} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

найнижча температура відпалу  $t_{\min} = t_{\max} - (100 \div 150)$ ;

максимальна товщина стінки  $a_{\max} = 0,5 \text{ см.}$

Таблиця 4.1

№ варіанту	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Mg O	Pb O	Ba O	Z rO <sub>2</sub>	ZnO	Na <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	68,74	3-4		6,2-8	–	–	–	–	-	12-18	0-8,5	–
2	68,9	3,9	-	5,5	2,9	-	-	-	-	17,8	1,3	-
3	70,7	4,2	2,3	7,0	-	-	-	-	-	13,9	1,9	-
4	69,2	3,5	1,2	5,8	3,6	-	-	-	-	16,0	0,9	-
5	67,0	6,7	3,0	4,3	-	-	-	-	-	19,0	-	-
6	71,0	0,85	-	7,7	3,8	-	0,5	-	-		15,5	-
7	75,0	6	7	1,7	-	-	4,3	-	-		6,5	-
8	79,0	3	11,9	-	-	-	-	-	-		5,5	-
9	70,84	4,48	6,31	4,17	2,02	-	-	-	2,62	8,37	0,99	0,36
10	69,0	4,90	4,3	4,50	-	-	3,5	-	5,5	8,6	-	-
11	69,25	5,96	8,56	0,99	0,45	-	3,63	-	-	8,57	2,25	0,33
12	64,3- 64,7	4-7	8,7- 12,0	0,1- 0,6	-	-	-	-	10- 12	7-9,7	-	-
13	74,7- 75,7	4,3- 6,2	7,0-8,7	0,75- 1	-	-	3,5- 4,2	-	-	6,5- 7,5	-	0,1- 0,3
14	76,6	3	6	-	-	-	3	3	-	8	-	-
15	80,0	2,71	11,31	0,76	-	-	-	-	-	4,74	0,35	-
16	80,0	2,25	13,0	-	-	-	-	-	-	3,50	1,15	0,05
17	78,25	2,74	12,18	0,85	-	-	-	-	-	5,39	0,41	-
18	79,69	3,10	10,29	0,77	0,87	-	-	-	-	5,20	-	-
19	80,6	2,70	12,20	0,12	-	-	-	-	-	4,15	-	-
20	74,66	3,89	13,44	0,75	0,49	-	-	-	-	5,89	0,79	-

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5

### ПОКРИТТЯ ВИРОБІВ

У електротехнічному виробництві широко застосовуються різноманітні покриття окремих деталей та виробів в цілому.

За призначенням покриття поділяють на:

- спеціальні (наприклад світлотехнічні – для створення певних світлотехнічних характеристик);
- захисні – для захисту металів від корозії;
- декоративні – для надання арматурі заданих декоративних параметрів.

За хімічним складом покриття поділяють на:

- металеві;
- неметалеві.

Неметалеві покриття поділяють на органічні (лаки, фарби, мінеральні масла, смоли, гума) та неорганічні (фосфати, оксиди, силікатні емалі).

Для напилення покриття визначеного функціонального призначення можуть бути використані матеріали різних груп (метали, сполуки, сплави, оксиди, карбіди, нітриди, полімерні матеріали, механічні суміші матеріалів та ін.). Використання при формуванні покриття матеріалу, що складається з кількох компонентів дозволяє отримувати складні за хімічним та фазовим складом структури, які переводять покриття до розряду композиційних.

При виборі складу покриття, поряд із експлуатаційними вимогами потрібно враховувати сумісність його з матеріалом основи та економічні показники застосування матеріалу: його собівартість, коефіцієнт використання тощо.

Під сумісністю розуміється принципова можливість адгезійної взаємодії матеріалів покриття і матеріалу виробу. Крім того, у сумісних покриттів фізико-хімічні процеси на межі розділу з основою в процесі експлуатації не ведуть до порушення стабільності вихідного стану композиції. Наприклад, виключається утворення гальванічних пар, крихких фаз та ін. Питання сумісності особливо важливі при створенні захисних покриттів і мають меншу значущість при створенні інших типів покриттів, наприклад, декоративних.

При виборі матеріалу покриття, стійкого до спрацьовування, необхідно враховувати характер взаємодії пари тертя. При всіх сполученнях матеріалів необхідно прагнути до вибору матеріалу покриття з мінімальним коефіцієнтом тертя.

Для напилення покриттів, стійких до спрацьовування, придатні матеріали всіх згаданих вище груп. Покриття повинні мати високу міцність зчеплення з основою і міцність матеріалу покриття (до 100...250 МПа).

Вимоги до пористості неоднозначні – покриття на інструменті, наприклад, повинні мати мінімальну пористість, а покриття, які працюють в умовах змашування (поршневі кільця, гільзи циліндрів та ін.), можуть мати значну пористість, що сягає 10...15 %.

На зношування добре працюють покриття, які містять тверді частинки та пластичну матрицю. Слабкі міцнісні зв'язки між окремими частинками покриття ведуть до їх викрошування. Тому створення розвиненого металевого каркасу в покритті за рахунок введення пластичного металевго компонента, підвищує опір зношуванню. Вміст пластичної фази може сягати 30...40 % (об'ємних).

Із матеріалів всіх груп формуються також корозієстійкі та жаростійкі покриття. Основним принципом вибору в цьому випадку є мінімізація негативного впливу взаємодії з агресивним середовищем, що досягається підбиранням відповідного матеріалу покриття з урахуванням фізико-хімічних властивостей матеріалу основи та складу та параметрів навколишнього агресивного середовища.

Покриття повинні мати мінімальну пористість, особливо скрізну та відкриту, тобто створювати ефективний бар'єр на шляху дифузії атомів газового середовища до основи і дифузії атомів основи через покриття у зворотньому напрямку. Матеріал покриття повинен мати низьку пружність пари при робочих температурах, слабо взаємодіяти з основою і навколишнім середовищем.

Покриття повинне бути механічно сумісним з основою і мати добре зчеплення з нею, тривало працювати без відшарування і руйнування.

Додаткові вимоги до матеріалу жаростійкого покриття і особливо його конструкції висуваються при необхідності їх роботи в умовах багатократних різких змін температури. У цьому випадку необхідне узгодження коефіцієнтів термічного розширення матеріалів основи та покриття.

Механічні способи обробки поверхонь перед нанесенням покриттів. Призначення та області застосування різних гальванопокриттів. Одержання дифузно відбиваючої поверхні. Печі для сушіння лакофарбових покриттів. Розрахунок товщини просвітлюючих плівок. Розрахунок товщини плівок для збільшення коефіцієнта відбивання скла.

Процес конструювання покриття містить у собі вибір складу матеріалу покриття, визначення структури системи "покриття-основа" та товщини шару (шарів) матеріалу, який створює робочу поверхню.

Досить поширеним є одношарове покриття (рис. 5.1, а). Його використання є доцільним у випадку створення конструкції "покриття-основа" із матеріалів з близькими значеннями коефіцієнтів термічного розширення. Необхідною умовою є також забезпечення міцності зчеплення покриття з основою. Як правило, такі умови витримуються при нанесенні металевих покриттів на металеву основу.

Більш поширеним є покриття з підшарком (рис. 5.1, б). Підшарок покриття – частина покриття, яка безпосередньо прилягає до основи і виконує функції зв'язку між основною частиною покриття і основою.

Основна частина покриття – частина покриття, яка розміщена над підшарком і виконує робочу функцію покриття. Основа – поверхня основного матеріалу, на яку наноситься покриття.

Підшарок має меншу, ніж основна частина покриття, товщину, яка лежить у межах 0,025...0,1 мм. Призначення прошарку – забезпечення

міцного зв'язку покриття з основою, а також узгодження коефіцієнтів термічного розширення матеріалів основної частини покриття і основи.

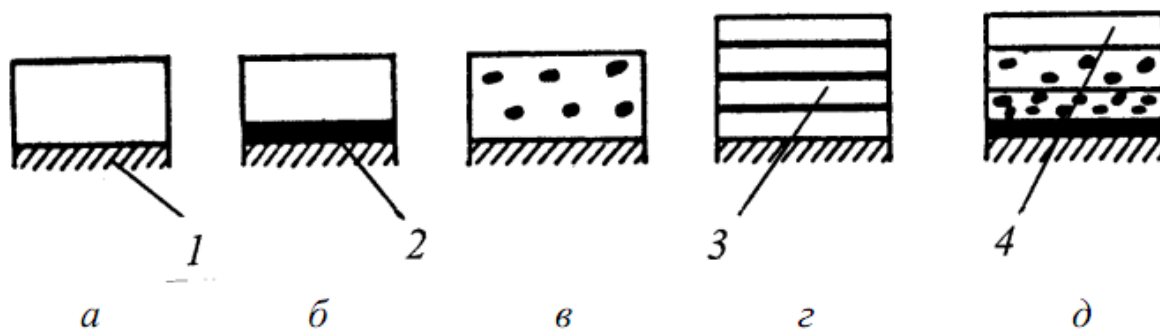


Рис. 5.1. Конструкції покриття:

а – одношарове покриття; б – покриття з прошарком; в – багатокомпонентне покриття; г – багатшарове покриття; д – градієнтне покриття (з поступовим переходом від матеріалу основи до матеріалу верхнього шару покриття);

1 – основа; 2 – прошарок; 3 – шар покриття; 4 – верхній шар покриття

Найчастіше, як прошарок, використовуються нікель-алюмінієві матеріали у вигляді композиційних порошків або сплавів. При нанесенні оксидних покриттів добрі результати, як матеріал прошарку, показують нікель-титанові сплави.

При конструюванні теплозахисних покриттів та покриттів, стійких до спрацьовування, перспективними можуть бути багатокомпонентні покриття (рис. 5.1, в). Покриття такого типу можуть бути отримані при нанесенні механічних сумішей або композиційних порошків. Композиційний порошок – порошок, кожна частинка якого складається із макрооб'ємів декількох компонентів, які відрізняються за хімічним складом, та ідентична за якісним складом всім іншим частинкам.

Обов'язковими складовими багатокомпонентних покриттів є наявність твердих та пластичних компонент. Пластична компонента покращує експлуатаційні властивості покриття, підвищує міцність зчеплення покриття з основою і міцність покриття, знижує його пористість. Як пластична фаза використовуються чисті метали (нікель, алюміній, кобальт, мідь, хром та ін.) або термореагуючі порошки алюмінідів, ніхром.

Тверда фаза (оксиди, карбіди, нітриди, борида, силіциди тощо) підвищує зносостійкість або покращує захисні властивості матеріалу покриття.

У випадку експлуатації покриття в умовах механічних ударних навантажень і тепловмін, а також при необхідності сполучення багатьох різних функціональних властивостей (наприклад, високої зносостійкості і корозієстійкості), використовуються багатшарові покриття (рис. 5.1 г).

Під багатшаровим покриттям розуміють покриття, що складається із двох або більше шарів, які відрізняються за складом.



Зовнішній шар – шар багатшарового покриття, поверхня якого стикається із зовнішнім середовищем. Проміжний шар газотермічного покриття – будь-який шар багатшарового покриття, що розміщується між основою або підшарком і зовнішнім шаром.

Товщина шарів залежить від методу нанесення покриття та його функціонального призначення і визначається розрахунково-експериментально із урахуванням технічно мінімально можливої товщини шару покриття.

Покриття із плавним переходом від одного матеріалу до іншого в межах товщини покриття називають градієнтним покриттям. Градієнтне покриття – це багатшарове покриття, в якому кожний проміжний шар містить кілька компонентів із градієнтом концентрації, що напрямлений від основи до зовнішнього шару (рис. 5.1, д).

Незважаючи на деяку технічну складність нанесення, градієнтне покриття може бути дуже перспективним при необхідності ретельного узгодження коефіцієнтів термічного розширення матеріалів основи і покриття та при нанесенні покриттів, матеріал яких не сумісний із матеріалом основи.

Важливим етапом процесу конструювання покриття є визначення його товщини. Товщина напиленого покриття на деталях, у яких зміцнюється поверхня або відновлюються втрачені розміри, повинна передбачати припуск на наступну обробку (токарну, фрезерну, шліфувальну).

Методика розрахунку товщини покриття з урахуванням припусків на обробку ілюструється на рис. 5.2.

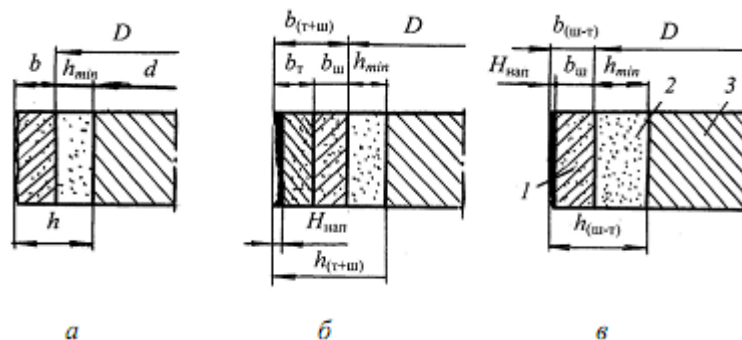


Рис. 5.2.

Рис.5.3. Схеми до розрахунку товщини покриття з урахуванням припусків на обробку:

а – припуск на обробку (загальний випадок); б – токарна (фрезерна) і шліфувальна обробка; в – шліфування без попередньої токарної (фрезерної) обробки;

1 – припуск на обробку; 2 – напилений шар покриття, який залишився після обробки; 3 – основний метал деталі

Товщина покриття, що нарощується на зовнішні поверхні, розраховується за формулою:

$$h = \frac{D - d}{2} + b \quad (5.1)$$

де  $D$  – номінальний діаметр деталі;

$d$  – діаметр деталі після підготовки до напилення;

$b$  – припуск на обробку після напилення.

Для забезпечення нормального функціонування виробу і необхідної міцності покриття, а також виключення деформації основи з покриттям, що перевищує допустиму, товщина покриття після кінцевої обробки не повинна бути менше деякої визначеної величини.

Мінімальна товщина покриття, що працює в умовах спрацьовування, збільшується на деяку величину  $h_{\text{ПС}}$ , пропорційну потрібному ресурсу роботи виробу.

В більшості випадків залежність між шляхом тертя  $L$  і величиною спрацьовування є лінійною, тому в умовах спрацьовування:

$$h_{\text{ПС}} = i_{\text{сн}} \cdot L \quad (5.2)$$

де  $i_{\text{сн}}$  – інтенсивність спрацьовування.

В умовах корозійного впливу зовнішнього середовища мінімальну товщину покриття збільшують на величину, пропорційну питомому зменшенню товщини покриття внаслідок корозійного руйнування протягом його експлуатації.

У згаданому випадку потрібно також враховувати висоту нерівностей, яка буде отримана при кінцевій обробці покриття, бо процес руйнування залежить від самої поверхні.

Аналогічно враховуються й інші фізичні величини, що залежать від товщини покриття, наприклад, діелектрична міцність.

У загальному випадку мінімальна робоча товщина покриття  $h_{\text{мін}}$  визначається за виразом:

$$h_{\text{мін}} = h_{\text{ПН}} + h_{\text{ПС}} + Rz_{\text{П}} + W_{\text{П}} \quad (5.3)$$

де  $h_{\text{ПН}}$  – товщина покриття, що забезпечує необхідну покриття і нормальне функціонування виробу;

$Rz_{\text{П}}$  – висота нерівностей, триманих при кінцевому переході обробки покриття;

$W_{\text{П}}$  – хвилястість поверхні виробу.

Розрахунок значення  $h_{\text{мін}}$  за формулою (5.3) ускладнений, внаслідок деякої попередньої невизначеності складових правої частини формули. Тому, враховуючи загальні міркування, попередні розрахунки та накопичений промисловістю досвід, в літературі для випадку відновлення деталей рекомендується емпірична мінімальна товщина покриття, яка залежить від діаметра деталі і, зазвичай знаходиться в межах від 0,6 до 1,0 мм [10].

Для токарної обробки деталей покриття наноситься з припуском  $b_{\text{Т}}$ , який залежить від діаметра деталі і, крім того, обумовлений ступенем рівномірності покриття за товщиною. Припуск  $b_{\text{Т}}$  заходиться у прямій залежності від висоти нерівностей напиленого покриття. Нерівності покриття

визначаються методом, який був застосований, і кваліфікацією оператора. Величина припуску  $b_T$  також залежить від кваліфікації токаря, що обробляє деталь після нанесення покриття. Величина припуску  $b_T$  практично може знаходитися в межах 0,5...1,0 мм.

Припуск на шліфування у розмір після обточування  $b_{Ш}$  залежить від якості абразивних кругів і точності верстата. Ця величина приймається в межах 0,15...0,20 мм.

Таким чином, загальний припуск на токарну (фрезерну) і шліфувальну обробку  $b_{(T+Ш)}$  розраховується як сума припусків  $b_T$  й  $b_{Ш}$ :

$$b_{(T+Ш)} = b_T + b_{Ш} \quad (5.4)$$

Мінімальну товщину покриття для наступної токарної (фрезерної) і шліфувальної обробки  $h_{(T+Ш)}$  можна розраховувати за формулою:

$$h_{T+Ш} = h_{\min} + b_{T+Ш} , \quad (5.5)$$

а для подальшого шліфування без попередньої токарної або фрезерної обробки

$$h_{T-Ш} = h_{\min} + b_{T-Ш} . \quad (5.6)$$

При виготовленні виробів з покриттям важливою умовою отримання якісного покриття в процесі його формування, а також ефективної експлуатації виробів з покриттям (особливо в умовах циклічної зміни температури експлуатації виробів) є узгодження коефіцієнтів термічного розширення (КТР) матеріалів покриття і основи.

Розрізняють лінійне та об'ємне розширення в деякому діапазоні температур. Коефіцієнт лінійного розширення характеризує відносне подовження тіла при нагріванні його на один градус:

Значення КТР у загальному випадку залежить від температури матеріалу. В ідеальному варіанті значення КТР матеріалу покриття повинно дорівнювати значенню КТР матеріалу основи у всьому робочому діапазоні температури експлуатації виробу.

При невиконанні цієї умови, наприклад, КТР покриття є більшим за КТР основи, у процесі охолодження покриття може руйнуватися, а при КТР покриття меншому за КТР основи доволіно відокремлюватися від основи.

Основним способом узгодження КТР матеріалів покриття і основи є нанесення підшарків із іншого матеріалу, які підвищують міцність зчеплення покриття з основою і одночасно, в деякій мірі, узгоджують КТР їх матеріалів.

Покриття, отримані методами вакуумно-конденсаційного напилення, як правило, не потребують подальшої обробки. Їх товщина визначається, як мінімально необхідна для забезпечення функціональних властивостей і складає від кількох мікрометрів до кількох десятків мікрометрів. Рациональна товщина реального покриття є результатом компромісу між технічними і економічними показниками деталі з вакуумно-конденсаційним покриттям.

У випадках застосування відносно тонких вакуумних покриттів важливим показником є різнотовщинність покриття. Різнотовщинність покриття – різниця між максимальною і мінімальною локальними товщинами покриття.

Характер розподілу речовини, що випаровується, у просторі над випаровувачем визначається двома основними параметрами: робочим тиском у вакуумній камері і густиною потоку атомів і молекул, які випаровуються.

У практиці вакуумного нанесення покриттів прийнята наступна умовна класифікація за ступенем вакууму залишкових газів у вакуумній камері: високий вакуум ( $\lambda \gg d$ ), середній вакуум ( $\lambda \approx d$ ) і низький вакуум ( $\lambda \ll d$ ), де  $\lambda$  – довжина вільного пробігу молекул;  $d$  – лінійний розмір вакуумної камери.

Якщо тиск пари речовини, що випаровується, при температурі  $T_v$  не перевищує 1,33 Па, то при робочому тиску у вакуумній камері порядку  $10^{-2}$  Па і менше молекули і атоми речовини, яка випаровується, досягають поверхні основи без стикання між собою і з молекулами залишкових газів. У цьому випадку реалізується молекулярний режим випаровування і конденсації, для якого справедливі закони Ламберта-Кнудсена:

- розподіл у просторі потоку речовини, який отриманий випаровуванням з плоскої поверхні, пропорційний  $\cos \phi$  ( $\phi$  – кут між напрямком розповсюдження пари і нормаллю до поверхні);

- кількість частинок, які потрапили на поверхню основи, зворотно пропорційна квадрату відстані між випаровувачем і основою.

Ці закони є базовими при аналізі закономірностей формування покриття на поверхнях будь-якої конфігурації.

Зазвичай допустима нерівномірність плівок за товщиною не перевищує 3...5 %. Товщина плівки  $d$  у довільній точці на поверхні нерухомої основи, що віддалена від точкового випаровувача на відстань  $h$ , визначається за формулою:

$$d = m_p \cdot \left[ 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot h^2 \cdot \left( 1 + \frac{l}{h} \right)^{1,5} \right]^{-1} \quad (5.7)$$

де  $m_p$  – маса речовини, яка перейшла у пар;

$\rho$  – густина речовини;

$l$  – відстань від центру основи до точки, яка досліджується.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Сборник задач, упражнений и практических заданий по технологии машиностроения / В.И. Аверченков [и др.]. – Новополюцк: ПГУ, 2008. – 312 с.
2. Нефедов Н.А., Осипов К.А. Сборник задач и примеров по резанию металлов и режущему инструменту: Учеб. Пособие для техникумов по предмету «Основы учения о резании металлов и режущий инструмент». – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: «Машиностроение», 1990. – 448 с.: ил.
3. Зубцов М.Е. Листовая штамповка: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности „Машины и технология обработки металлов давлением”. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1980. – 432 с., ил.
4. Основы материаловедения. Учебник для вузов / Под ред. И.И. Сидорина. – М.: Машиностроение, 1976. – 436 с.
5. Рудман Л.И. Наладка прессов для листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1980. – 219 с.
6. Справочник контролера машиностроительного завода. Допуски, посадки, литейные измерения / Под ред. А.И. Якушева. – М.: Машиностроение, 1980. – 527 с.
7. Бухарін С. Л. Конспект лекцій з курсу “Світлотехнічні матеріали” (для студентів 2 курсу денної і 3 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050702 «Електротехніка та електротехнології» спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”). / С. Л. Бухарін, Харк. нац. акад. міськ. госп-ва – Х.; ХНАМГ, 2009 – 83 с.
8. Методичні вказівки для опрацювання курсу і виконання курсової роботи „Технологія світлотехнічного виробництва” (Розділ „Світло пропусканні матеріали. Технологія виготовлення виробів із світло пропусканні матеріалів”) для студентів спеціальності „Світлотехніка та джерела світла”. Укл.: Андрійчук В.А., Гевко Б.М., Костик Л.М. – Тернопіль: ТДТУ, 2004.
9. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов: Учебное пособие-справочник / Под редакцией д.т.н., проф. В.Д. Евдокимова. – Одесса Николаев: Изд-во НГГУ им. Петра Могила, 2005. – 352 с.
10. Технологія нанесення покриття: Метод. вказівки до виконання курсової роботи та практичних занять для студ. спец. “Технологія та устаткування відновлення і підвищення зносостійкості машин і конструкцій”/ Уклад.: Пашенко В.М. – К.: ІВЦ “Політехніка”, 2003. – 52 с.
11. Методичні вказівки до виконання курсової (контрольної) роботи з курсу „Технологія світлотехнічного виробництва”, „Технологія обробки тиском” для студентів усіх форм навчання за напрямками підготовки 6.09025 „Інженерна механіка”, 6.0906 „Електротехніка” з орієнтацією на спеціальності 7.090202 „Технологія машинобудування”, 7.090605 „Світлотехніка та джерела світла”. / Укл.: Гевко Б.М., Луценко А.М., Комар Р.В. – Тернопіль: ТДТУ, 2004.

## This image shows a full page of blank, lined paper. It features approximately 28 horizontal blue or grey lines spaced evenly apart, typical of notebook paper. The lines extend across the entire width of the page, leaving small margins at the top and bottom. There are no vertical lines, text, or other markings on the page.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.